



Etude expérimentale de la nage anguilliforme : application à un robot biomimétique

Younes Matar

► To cite this version:

Younes Matar. Etude expérimentale de la nage anguilliforme : application à un robot biomimétique. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Ecole des Mines de Nantes, 2013. Français. NNT : 2013EMNA0059 . tel-00821185

HAL Id: tel-00821185

<https://theses.hal.science/tel-00821185>

Submitted on 7 May 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

Younes MATAR

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Nantes
sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans*

École doctorale : SPIGA

Discipline : *Mécanique des milieux fluides*

Spécialité : *Hydrodynamique - robotique*

Unité de recherche : *Génie des Procédés Environnement Agro-alimentaire (GEPEA)*

Soutenue le 21 mars 2013

Thèse N° : 2013EMNA0059

Etude expérimentale de la nage anguilliforme

Application à un robot biomimétique

JURY

Rapporteurs :	M. Jacques-ANDRE ASTOLFI , Maître de conférences HDR, IRENav – Ecole Navale de Brest M. Christophe ELOY , Maître de conférences HDR, IRPHE - Université Aix-Marseille
Examineurs :	M. Michel BERGMANN , Chargé de recherche CR, IMB – INRIA Bordeaux M. Frédéric BOYER , Professeur, IRCCyN - Ecole des Mines de Nantes M. David LAURENT , Professeur, Pprime - Université de Poitiers M. Rafic YOUNES , Professeur, Doyen de la Faculté de Génie de l'Université Libanaise, Beyrouth
Invité :	M. Mathieu POREZ , Maître de conférences, IRCCyN - Ecole des Mines de Nantes
Directeur de Thèse :	M. Camille SOLLIEC , Professeur, GEPEA - Ecole des Mines de Nantes
Co-encadrant de Thèse :	M. Fabien CANDELIER , Maître de conférences, IUSTI - Université Aix-Marseille

" À ma mère, c'est ton cadeau le jour de la fête des mères"
21 mars au Liban c'est l'équinoxe du printemps et surtout la fête des mères

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire est le fruit de trois années de recherche au sein du Département Systèmes Énergétiques et Environnement de l'École des Mines de Nantes, réalisé dans le cadre d'un projet Européen, nommé ANGELS.

Je souhaite exprimer ici toute ma reconnaissance aux personnes qui ont contribué non seulement à la réalisation de ce travail mais aussi à rendre cette période inoubliable.

Avant tout, je tiens à remercier Camille Sollicec (directeur de thèse) pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce doctorat. Son dynamisme et son souci permanent de me fournir une formation de qualité m'ont permis d'aborder avec sérénité ce sujet à la fois complexe et passionnant. J'ai aussi pu apprécier au cours de ces années, l'étendue de ses qualités scientifiques et humaines.

Une partie conséquente de ce travail n'aurait sans doute jamais été réalisée sans les idées et les conseils de Fabien Candelier (co-encadrant). Travailler à ses côtés s'est avéré à la fois enrichissant et stimulant. J'ai apprécié sa sympathie, sa simplicité et sa pédagogie. Grand merci.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de l'équipe de techniciens du laboratoire DSEE. Sans leur travail et leurs conseils, le dispositif expérimental n'aurait jamais vu le jour. Un merci plus particulier à Patrick Brion, François-Xavier Blanchet, Yvan Gouriou et Jérôme Martin pour la qualité de leur contact humain ainsi que pour avoir su trouver le temps pour réaliser le banc d'essais ainsi que ses multiples modifications.

Je souhaite par ailleurs exprimer toute ma gratitude à Messieurs Christophe Eloy et Jacques-André Astolfi, pour avoir accepté de rapporter cette thèse. Je les salue pour le temps précieux qu'ils ont consacré à la lecture de cette étude ainsi que pour leurs conseils avisés. Un grand merci également à David Laurent pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury, ainsi qu'à Rafic Younes (Doyen de la faculté de génie de l'Université Libanaise) et à Michel Bergmann d'avoir acceptés d'être examinateurs de ce travail. Je tiens à remercier Frédéric Boyer (Chef du projet ANGELS) pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse, et surtout part pour nos multiples échanges scientifiques. Un merci également à Mathieu Porez pour son aide et ses conseils sa correction du dernier chapitre de ce mémoire.

Je remercie aussi les partenaires du projet, avec qui j'ai eu l'opportunité de collaborer, à savoir : l'équipe robotique de l'EMN (porteur du projet), l'équipe Biorob de L'EPFL (Suisse) et l'équipe Mécatronique de SSSA (Italy).

Je remercie mes collègues du département, Fred, Sary, Cristian, Ernesto, Nicolas, Stéphane,

Vanessa, Audrey, Olivier, Luisa, Séverine, Espérance, Nadine, J. Sébastien, Albert... pour les moments passés ensembles, les sorties, les barbecues et les pauses cafés. Je ne peux qu'espérer retrouver une telle ambiance dans mes futures fonctions. À tous, plus que de simples collègues, je vous compte désormais parmi mes amis. Je vous souhaite le meilleur pour la suite et beaucoup du bonheur dans votre vies.

Une pensée particulière à mes collègues de bureaux : Adrien, Carolina et Laura. Partager avec vous le bureau D113 était un grand plaisir. Vos soutiens, vos conseils et vos présences ont rendu le travail moins difficile. Vous faites partie de mes meilleurs amis. Je ne vous direz pas au revoir, car vous serez toujours présents dans mes pensées.

Je ne peux pas oublier les "footballeurs" de l'EMN. Merci pour les matches de foot que j'ai pu partager avec vous.

Merci également à mes amis Nantais et les Libanais de Nantes... avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

Merci à Jad (mon frère), qui était présent pour me soutenir dès mon arrivé en France, jusqu'au moment présent.

Merci à Gisselle (ma copine), qui a tout fait pour m'aider, qui m'a soutenu et surtout m'a supporté durant ces derniers mois de rédaction. Je serai toujours reconnaissant.

Pour finir, j'adresse mes derniers remerciements à ma famille : mon père, ma mère, mes frères jumeaux (Nader et Maher) et une deuxième fois mon frère Jad, qui ont toujours été présents en m'apportant le soutien dont j'avais besoin et en m'appuyant dans mes décisions.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Moyens expérimentaux	7
1.1 Description générale du canal hydrodynamique	7
1.2 Calibration du banc	9
1.3 Techniques expérimentales associées	11
1.3.1 Acquisition vidéo et traitement d'image	11
1.3.2 Mesure des forces hydrodynamiques	12
1.3.3 Vélocimétrie par Images de Particules	12
2 Étude et caractérisation de la nage d'une anguille réelle	17
2.1 Introduction	17
2.2 Généralités sur la nage	17
2.2.1 Mode de propulsion ondulatoire	18
2.2.2 Nage anguilliforme	19
2.3 Expérimentation sur la nage de l'anguille Européenne	21
2.3.1 Méthodologie expérimentale	21
2.3.2 Résultats et discussion	29
2.3.3 Conclusion	38
3 Étude expérimentale de l'écoulement latéral produit lors de la nage	39
3.1 Introduction	39
3.2 Positionnement du problème et retour sur la LAEBT	40
3.2.1 Expression théorique du potentiel de l'écoulement dans la section latérale du corps	42
3.3 Visualisation par PIV de l'écoulement dans les sections latérales	44
3.3.1 Instrumentations et méthodes	44
3.3.2 Résultats et discussions	50
3.3.3 Conclusion	53

4 Interactions hydrodynamiques	57
4.1 Introduction	57
4.2 Instrumentations et méthodes	60
4.2.1 Système d'oscillation à double aileron	60
4.2.2 Dispositif expérimental	61
4.3 Résultats	64
4.3.1 Qualification de l'écoulement tourbillonnaire dans le sillage des ailerons	64
4.3.2 Nage de l'Amphibot III dans une allée de Bénard Von-Kàrmàn BvK	69
4.3.3 Nage d'une anguille dans une allée Benàrd von-Kàrmàn BvK inversée	83
5 Modèle dynamique du module ANGELS	91
5.1 Introduction	91
5.2 Modèle cinématique	92
5.2.1 Caractéristiques du module ANGELS	92
5.2.2 Repères et références	93
5.2.3 Matrice de transformation	94
5.3 Modèle dynamique d'un corps solide-rigide	95
5.3.1 Calculs des matrices d'inertie et de coriolis	96
5.4 Étude expérimentale	101
5.4.1 Matériels et méthodes	101
5.4.2 Force de traînée	101
5.4.3 Forces de propulsion	105
5.5 Conclusion	110
Conclusions et perspectives	113
Bibliographie	123
Annexes	125
Annexe A	127
A.1 Conception et modélisation numérique de l'écoulement dans le banc d'essai	127
A.2 Résultats numériques	129
Annexe B	131
B.1 Algorithme de calcul théorique de l'écoulement dans la section latéral du corps durant la nage	131
Annexe C	133
C.1 Décalage de fréquence entre le robot et l'allée BvK	133
C.1.1 Estimation de la différence de fréquence	134

<i>Table des matières</i>	vii
Annexe D	135
D.1 Matrice numérique du modèle dynamique du déplacement du module ANGELS .	135
Liste des figures	144
Liste des tables	145

Introduction Générale

Dans les années 1730, le célèbre canard de Jacques de Vaucanson qui pouvait, entre autre boire, se nourrir, digérer sa nourriture, a ébloui les spectateurs de l'époque. Cette époque est considérée comme l'âge d'or de l'automate¹. L'apparition de ces robots remonte à l'antiquité, comme par exemple, le pigeon volant d'Archytas de Tarente ou les fameuses scènes de théâtres animées de Héron d'Alexandrie.

Au début du XX^e siècle, ces machines ont connu une évolution importante. C'est suite aux travaux des chercheurs, dont le but était de tester les hypothèses émises par des biologistes et psychologues, que les premiers robots autonomes sont apparus. Ces robots sont habituellement équipés de capteurs qui leur permettent de s'adapter à leur environnement contrairement aux robots automates programmés au préalable.

L'avancement de la technologie ainsi que l'ambition de l'homme, ont poussé les scientifiques à aller encore plus loin. C'est en 1956 que la robotique a connu un nouvel essor et le mot "Intelligence Artificielle - IA"² est apparu dans le monde de la robotique autonome. L'IA repose sur des modèles mathématiques complexes et s'appuie sur un apprentissage, voire une éducation des machines, comme peut le faire l'être humain. Mais une question se pose aujourd'hui concernant les limites de l'IA, comme cela a été souligné par le philosophe Dreyfus en 1972 dans son livre intitulé « *What computers can't do : The Limits of Artificial Intelligence* ». Quoi qu'il en soit, ce que l'on peut dire de nos jours, c'est que les machines conçues par l'homme sont encore loin de présenter une intelligence comparable à la sienne.

Depuis ces dernières années, revenant un peu du paradigme de l'intelligence artificielle, de nouvelles voies ont donc été explorées par les roboticiens. En particulier, l'une des approches alternatives, connue sous le nom de biomimétisme, consiste à imiter, ou plus modestement à s'inspirer des systèmes vivants pour concevoir des robots munis de leurs fonctionnalités.

L'un des domaines de la robotique où cette approche s'avère prometteuse concerne le développement d'engins dédiés à l'exploration sous-marine, généralement appelés AUV (Autonomous Underwater Vehicles). En effet, les véhicules sous-marins actuels présentent généralement de faibles performances hydrodynamiques ainsi qu'une manœuvrabilité souvent réduite, loin d'être comparable à certains êtres vivants, notamment les poissons.

1. Robot qui exécute des tâches d'une manière automatique

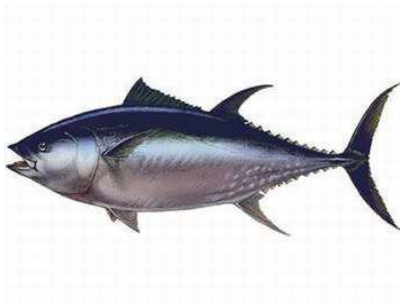
2. Ce nom est donné par John McCarthy, pionnier dans l'intelligence artificielle

Petit tour d'horizon de la robotique sous-marine biomimétique

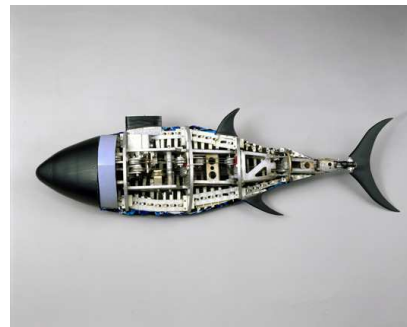
De ce fait, de part le monde, de nombreuses équipes de recherche se sont lancées sur ce sujet. A titre d'exemple, on peut mentionner le robot Thon américain du M.I.T ou encore le robot serpent (ACM6-R5) de l'Institut de Technologie de Tokyo :

- **Le robot Thon de M.I.T :**

Le projet "Robotuna" (Barett 1996) avait pour objectif de trouver des lois de nage permettant d'optimiser le rapport force produite/consommation d'énergie dans le but d'améliorer les systèmes de propulsion des véhicules autonomes sous-marins. La structure et la forme du robot sont inspirées du thon naturel, poisson choisi pour sa rapidité et ses accélérations (figure 1).



poisson thon



robot thon de M.I.T

FIGURE 1 – Le robot thon du M.I.T inspiré du thon naturel (www.sciencemuseum.org.uk/image, www.linternaute.com).

- **le robot serpenter (ACM6-R5) de l'Institut de Technologie de Tokyo :**

Ce robot Japonais inspiré du serpent (figure 2) est sans doute le plus performant au monde du point de vue de la locomotion, aussi bien en milieu terrestre qu'en milieu aquatique (Yamada *et al.* 2005).

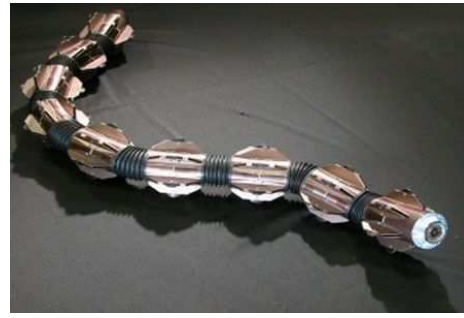
Plus spécifiquement, en Europe, on peut mentionner le robot lamproie (Amphibot III) de l'EPFL, le robot Lampetra de SSSA (mettre la ref) ainsi que le robot anguille (RAAMO) de l'équipe robotique du laboratoire IRCCYN de Nantes :

- **le robot lamproie (Amphibot III) de l'EPFL :**

Ce robot européen inspiré de la Lamproie est constitué de plusieurs segments identiques dont le nombre est variable (figure 3). Il est capable de ramper sur le sol et de nager dans l'eau en adaptant son mouvement ondulatoire lors du passage sol-eau. L'originalité de ce robot réside dans son informatique qui reproduit le fonctionnement de la moelle épinière de plusieurs classes de robots grâce à un réseau de neurones (Crespi et Ijspeert 2008).



serpent d'eau



robot ACM6 - R5

FIGURE 2 – Le robot Japonais ACM6-R5 inspiré du serpent (info-japan.ru et www.linternaute.com).



poisson Lamproie



robot Amphibot

FIGURE 3 – Le robot Amphibot III de l'EPFL inspiré de la Lamproie (birg2.epfl.ch).

- le robot anguille (ANR-RAAMO) de l'équipe robotique du laboratoire IRC-CYN de l'école des Mines de Nantes (EMN) :

Le robot "RAAMO" (Boyer *et al.* 2009), inspiré de l'anguille et capable de nager en trois dimensions (figure 4) est composé de plusieurs modules reliés entre eux par des liaisons rotules (i.e. une liaison à trois degrés de liberté), actionnées par trois moteurs à courant continu.



poisson anguille



robot RAAMO

FIGURE 4 – Le robot RAAMO inspiré de l'anguille (www.lejournalnature.com et www.irccyn.ec-nantes.fr).

- le robot Lamproie (Lampetra) de l'école Supérieure de Scuola Sant'Anna SSSA :

Le projet européen Lampetra (Stefanini et al. 2012) avait pour objectif de concevoir un robot inspiré de la Lamproie qui est très performant, en termes de manœuvrabilité, et de rendement énergétique. Ce robot est constitué d'un grand nombre de segments (voir figure 5) et d'un nouveau concept mécanique réduisant significativement la consommation d'énergie.

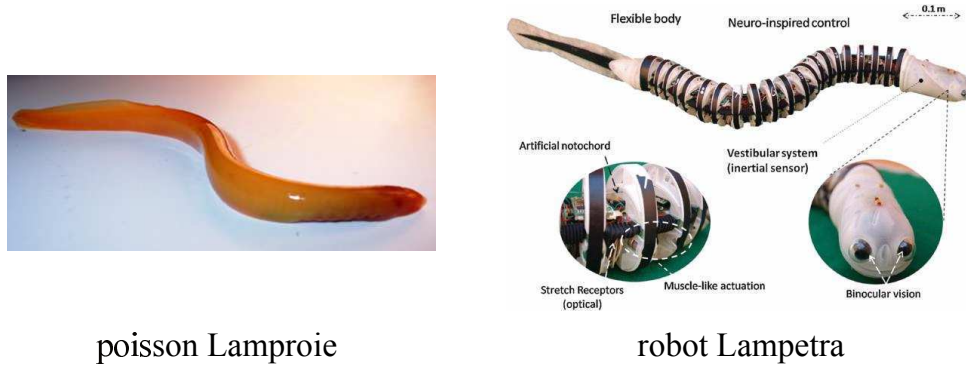


FIGURE 5 – Le robot *Lampetra* de l'SSSA inspiré de la Lamproie (www.lampetra.org).

Comme nous pouvons le voir, le savoir faire européen en matière de robotique sous-marine bio-inspirée est assez conséquent. C'est fort de ce constat que, sous l'initiative de F. Boyer (Pr à l'EMN) un projet européen regroupant entre autres l'EMN, l'EPFL et SSSA, a été imaginé.

Ce projet, baptisé ANGELS (pour ANGuilliform robot with ELectric Sens), a été financé par la commission européenne (Information Society and Media, Future and Emerging Technologies, contract number : 231845) et a donné lieu notamment à ce travail de thèse.

Le projet ANGELS

ANGELS est un projet européen qui rassemble huit partenaires autour d'un même objectif : la réalisation d'un prototype de robot anguille qui soit autonome, muni du sens électrique et reconfigurable.

Ce prototype est constitué de neuf modules identiques, qui dans la première configuration envisagée, sont reliés entre eux par des liaisons pivots (voir figure 6 a). Dans une telle configuration, le mode de locomotion adopté par le robot sera inspiré de la nage des poissons anguilliformes. Dans une seconde configuration, les modules se séparent et se déplacent de manière indépendante à l'aide de propulseurs à hélices (voir figure 6 b).

L'intérêt de cette reconfigurabilité est d'allier deux fonctionnalités habituellement opposées, à savoir l'efficacité de la nage pour parcourir de grande distance (nage anguilliforme) et la manœuvrabilité dans des volumes restreints (agent indépendant).

Par exemple, un des scénarios type envisagé dans le projet est le suivant : (i) le robot part de la base à la recherche d'un objet situé sur un site lointain. Pour effectuer le trajet de la base vers ce site, le robot adopte la configuration regroupée (i.e. nage anguilliforme). (ii) Arrivé sur

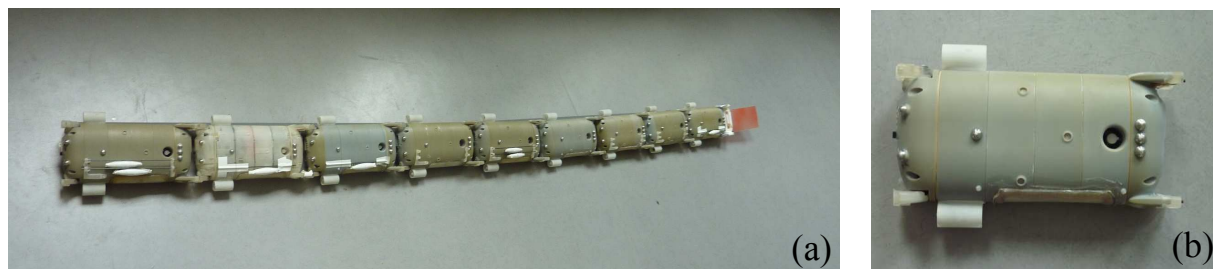


FIGURE 6 – Configurations du robot ANGELS : (a) neuf module reproduisant la nage d’une anguille et (b) un seul module se déplace à l’aide des propulseurs.

place, le robot se scinde en agents autonomes afin d’optimiser l’exploration spatiale du site et identifier d’éventuels objets (notamment à l’aide du sens électrique). (iii) Une fois cette tâche effectuée, le robot rentre à la base en réadaptant la première configuration.

Objectifs de ces travaux de thèse

Du point de vue du mécanicien, étudier la nage revient à s’intéresser à trois systèmes dynamiques (voir figure 7) distincts mais fortement couplés à savoir, (i) la dynamique interne, qui correspond simplement à l’actionnement des degrés de libertés internes du nageur ; (ii) la dynamique du fluide environnant, qui résulte du changement de forme du corps et (iii) la dynamique externe, qui correspond au mouvement d’ensemble du nageur et qui est produit par une modification des contraintes exercées par le fluide sur le corps.

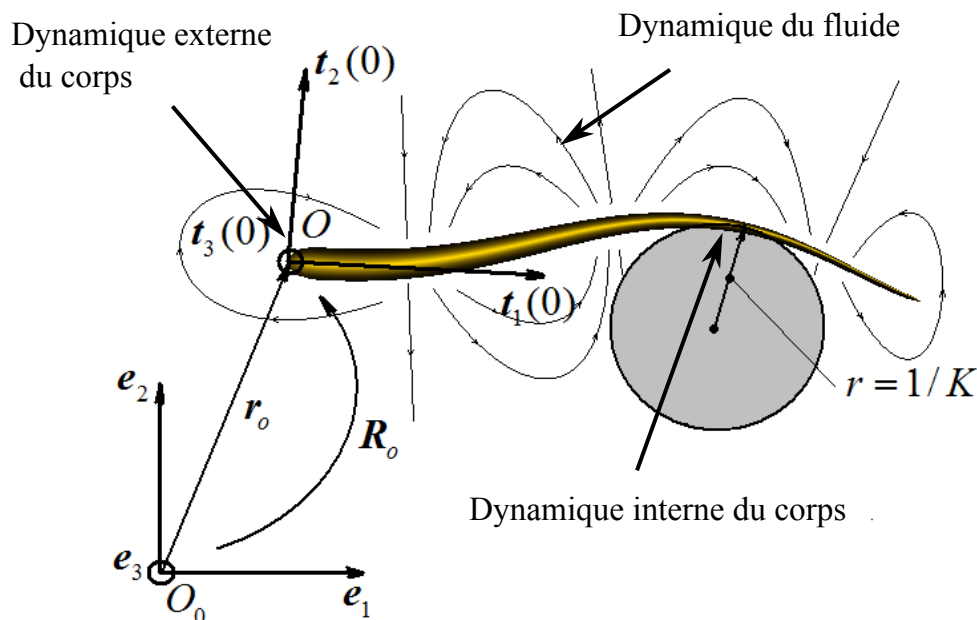


FIGURE 7 – Les trois dynamiques associées à la nage.

L’objectif général de ces travaux de thèse est de contribuer, par le biais d’études expérimentales, à une meilleure compréhension de ces phénomènes physiques impliqués lors de la nage

dite anguilliforme (configuration 1 du robot). Pour réaliser ces expériences, nous avons conçu un banc d'essais à recirculation d'eau. Les différentes études portant sur la nage anguilliforme ont été réalisées soit en écoulement forcé uniforme, ou en écoulement non-uniforme (allée de vortex alternée) afin d'étudier les interactions hydrodynamiques.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, le banc expérimental, conçu intégralement dans le cadre de cette thèse, sera présenté.

Dans le second chapitre, des études réalisées sur la nage d'une anguille dans un écoulement uniforme sont présentées où en particulier nous nous sommes intéressés aux différentes allures de nage (i.e. lois de déformation du corps) adoptées par le poisson pour se maintenir dans l'écoulement ou s'y déplacer.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la nature de l'écoulement latéral produit lors de la nage anguilliforme. Ces travaux ont été menés afin d'apporter une validation expérimentale à des travaux théoriques (Candelier *et al.* 2011), développés par ailleurs dans le cadre du projet ANGELS, portant sur le modèle dynamique de nage établi par Lighthill (1971) et connu sous le nom de "Large Amplitude Elongated Body Theory".

Le quatrième chapitre porte sur une étude des interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans un écoulement non-uniforme (allée de vortex alternée), dans le but de mettre en évidence certains mécanismes d'extraction d'énergie de l'écoulement permettant d'optimiser les performances hydrodynamiques de la nage.

Enfin, le dernier chapitre de cette thèse porte sur une étude annexe des performances hydrodynamiques d'un module élémentaire composant le robot ANGELS précédemment présenté (configuration 2). Les résultats obtenus sont incorporés dans un modèle dynamique destiné à être utilisé dans un simulateur de commande du module.

Chapitre 1

Moyens expérimentaux

1.1 Description générale du canal hydrodynamique

La conception et la construction du banc d'essais hydrodynamique ont constitué la première tâche réalisée dans le cadre de cette thèse. Ce canal servira à la réalisation des études expérimentales portant sur la nage des anguilles naturelles ainsi que sur le prototype du robot ANGELS. Pour ce faire, plusieurs critères ont dû être respectés durant la conception du banc : une large zone d'étude, un écoulement continu à profil de vitesse uniforme et une surface transparente permettant de réaliser des mesures expérimentales par visualisation. Nous avons donc choisi de créer l'écoulement dans un aquarium équipé d'une turbine axiale, permettant de générer un écoulement en boucle. Pour cela, nous séparons l'aquarium en deux parties par un plancher horizontal en inox, afin que la turbine, placée dans la partie inférieure, propulse l'eau en continu vers la partie supérieure (voir figure 1.1). De plus, nous avons placé une large fenêtre de visualisation sur une façade latérale de l'aquarium, afin d'avoir un accès visuel à toute la zone d'étude.

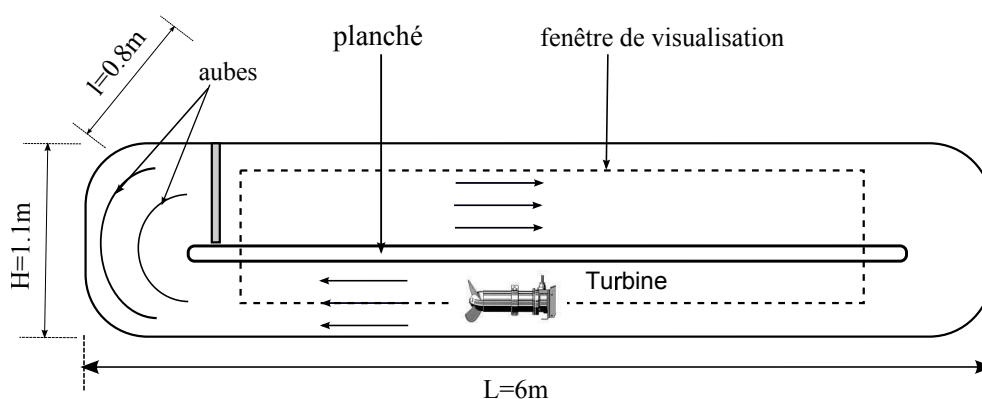


FIGURE 1.1 – Schéma représentatif du principe du banc d'essai.

En remontant de la partie inférieure vers la partie supérieure du banc, le fluide passe nécessairement par un virage assez serré. L'écoulement est donc fortement perturbé dans la zone d'étude. Afin de remédier à ce problème, nous avons choisi d'installer, en aval de la turbine, des

aubes de formes semi-circulaires (appelées ultérieurement géométrie interne du banc), permettant de redresser partiellement l'écoulement. Pour optimiser cette géométrie interne (nombre, distance et emplacement des aubes), une étude numérique (3D) de l'écoulement a été réalisée, pour différentes configurations, à l'aide du logiciel de modélisation et de calcul numérique "ANSYS, CFX". Un aperçu de cette étude numérique est présenté en annexe A.

Il est à noter que par rapport à la géométrie présentée dans cette étude numérique et à des fins d'amélioration de l'écoulement dans la zone d'étude, certaines modifications mineures ont été apportées *a posteriori* à la géométrie interne du banc d'essai. De plus, afin d'homogénéiser l'écoulement dans la zone d'essai (i.e. limiter les effets 3D), un nid d'abeille a été installé à la sortie des aubes.

La longueur de l'aquarium constituant le banc lui-même est de 6 mètres, sa largeur de 0.8 mètre et sa hauteur de 1.1 mètres. Il est installé dans la halle de recherche du Département Systèmes Energétiques et Environnements (DSEE) de l'école des Mines de Nantes (EMN). Cet aquarium a été construit à La Rochelle - FRANCE par la société "COUNTANT". La figure 1.2 présente quatre photographies de l'aquarium.

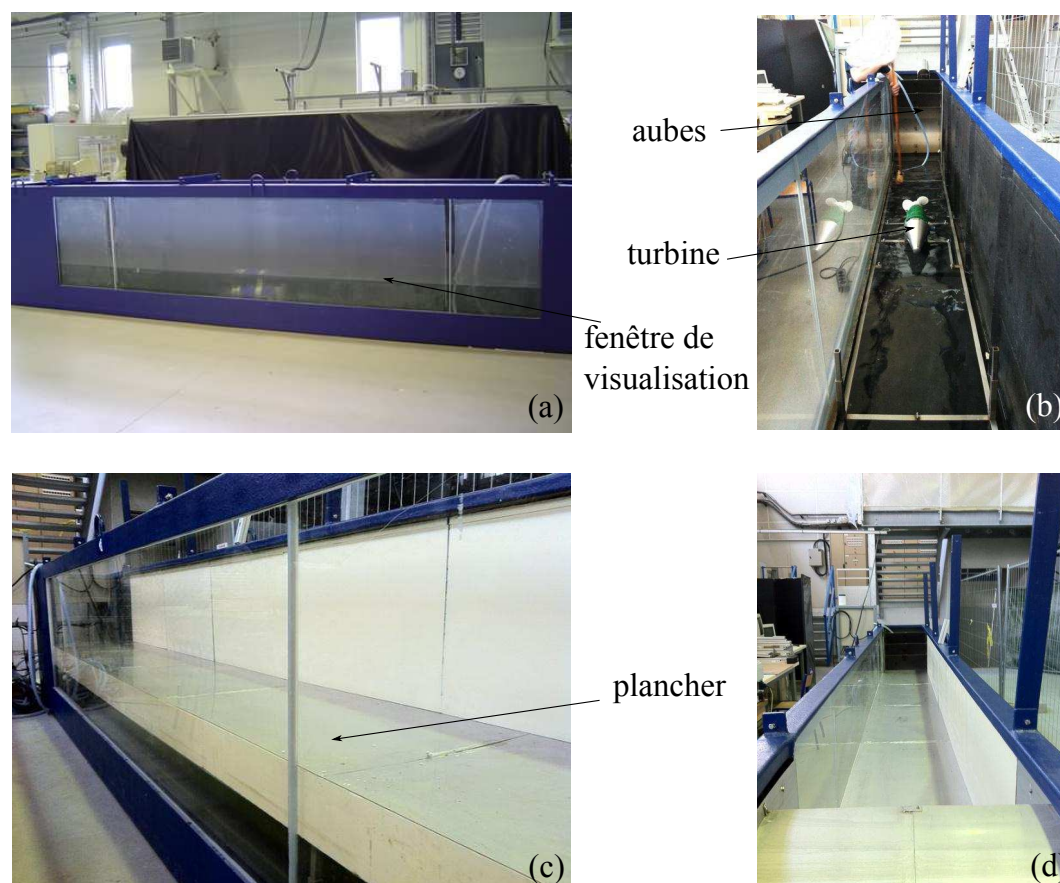


FIGURE 1.2 – Photographies des différents composants du banc d'essai hydrodynamique : aquarium (a), turbine installée au fond de l'aquarium (b), et (c) et (d) aquarium après l'installation de la géométrie interne.

1.2 Calibration du banc

Après la construction et la mise en place des différents composants du banc, le profil des vitesses axiales a été mesuré à l'aide d'un courantomètre à hélice, afin de calibrer l'écoulement. La figure 1.3 présente un schéma de la section d'étude dans laquelle ces mesures ont été effectuées. Le plan (y, z) qui divise l'aquarium en deux (plan de couleur bleu), est centré sur l'axe des x .

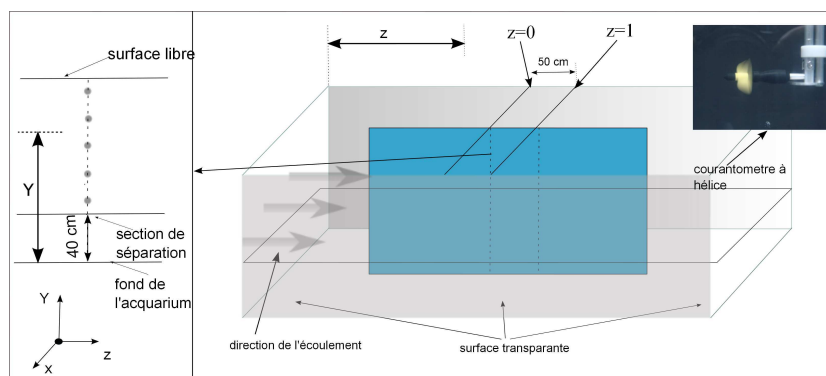


FIGURE 1.3 – Schéma représentatif de la mesure de vitesse par courantomètre à hélice.

Du fait de la présence des parois et d'une surface libre, l'écoulement ne correspond pas parfaitement à un écoulement uniforme. Les frottements visqueux sur les parois conduisent au développement d'une couche limite, qui s'épaissit avec l'éloignement de la sortie des aubes. Nos études ont été effectuées à une position médiane, c'est à dire, à au moins 15 cm au dessus de la section de séparation et à au moins 15 cm au dessous de la surface libre (voir figure 1.3). La largeur de l'aquarium nous permet de négliger l'effet des parois latérales. La figure 1.4 nous

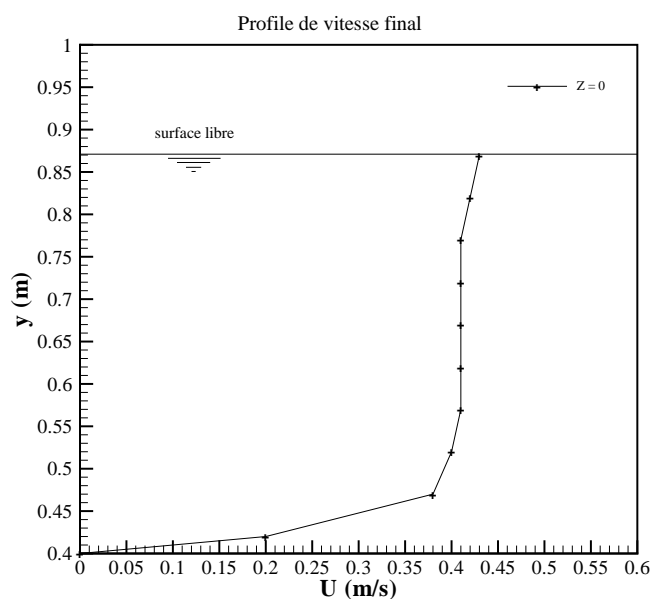


FIGURE 1.4 – Profil de vitesse finalement obtenu.

montre le profil des vitesses axiales obtenues, pour la fréquence maximale (40 Hz) de rotation

de la turbine, dans le plan médian de la zone d'étude, c'est à dire à la position $z = 0$. Nous remarquons que le profil est quasi-uniforme de vitesse moyenne égale 0.4 m/s.

Par ailleurs, comme la vitesse de l'écoulement dans le banc d'essai dépend naturellement de la fréquence de rotation de la turbine, nous avons aussi réalisé un ensemble de mesure de vitesse, cette fois-ci uniquement à mi-hauteur de la zone d'essai, mais pour différentes fréquences de rotation de la turbine. La courbe est présentée sur la figure 1.5. On peut déduire que la vitesse de l'écoulement en position centrale est une fonction quasi-linéaire de la fréquence de rotation de la turbine, comme attendu.

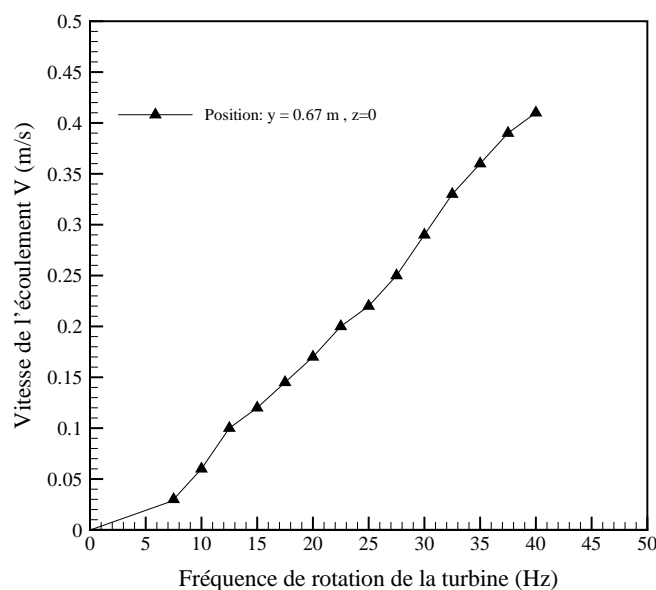


FIGURE 1.5 – Vitesse de l'écoulement en fonction de la fréquence de rotation de la turbine axiale.

Enfin, nous avons mis en place toutes les mesures de sécurités nécessaires à la réalisations d'expérimentation par visualisation laser, afin de nous assurer que le banc d'essai soit bien en conformité avec les normes de sécurité imposées par la communauté européenne. On peut également mentionner que chaque personne susceptible de travailler sur le banc a suivi une formation de sécurité laser. La figure 1.6 présente une photographie du banc d'essai tel qu'il a été utilisé dans le cadre de cette thèse.

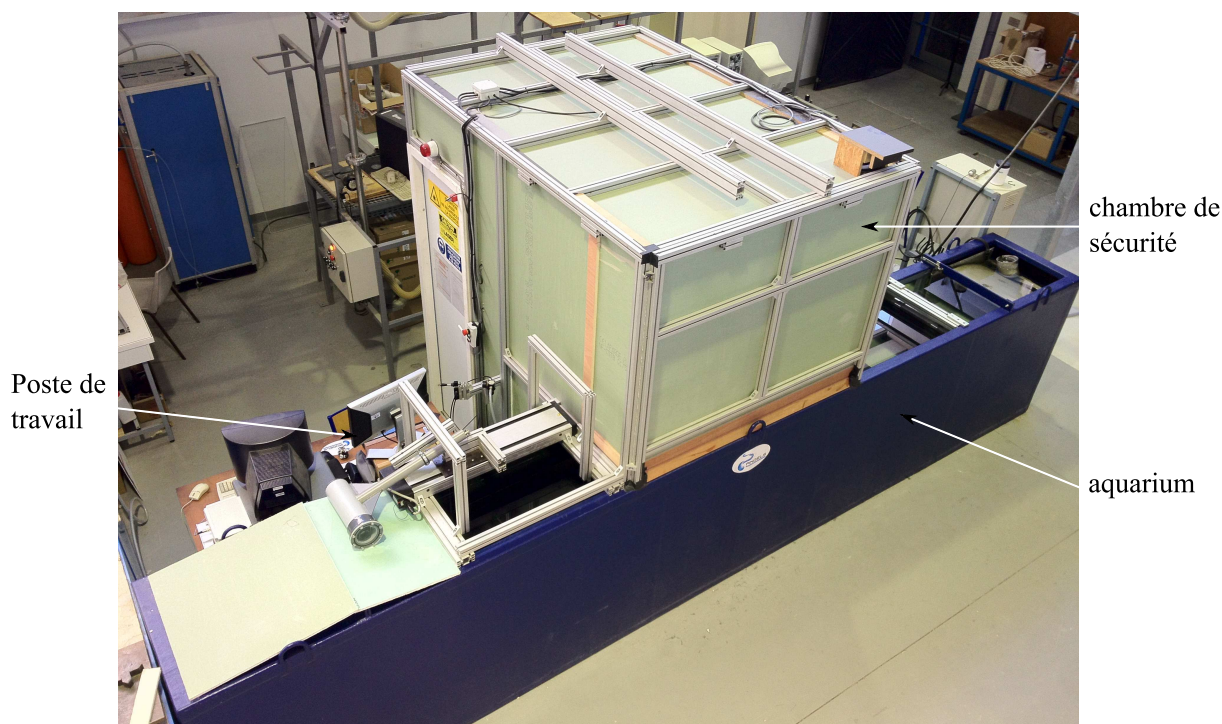


FIGURE 1.6 – Photographie du banc d'essai final.

1.3 Techniques expérimentales associées

Pour réaliser nos expériences, diverses techniques expérimentales ont été utilisées, allant de la simple visualisation ne nécessitant qu'une acquisition vidéo et un traitement d'image, à des techniques plus sophistiquées telles que la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV). Nous décrivons brièvement dans ce qui suit, le principe de base de ces techniques ainsi que le matériel utilisé pour réaliser ces expériences.

1.3.1 Acquisition vidéo et traitement d'image

Cette technique permet d'étudier le suivi temporel de la déformation d'un corps en mouvement dans un milieu fluide. Plus précisément, cette technique nous servira à l'étude de la déformation d'une anguille naturelle lors de la nage dans des conditions d'écoulement bien contrôlées. La figure 1.7 montre le dispositif expérimental dédié à cette technique de mesure. Le mouvement de l'anguille est filmé à l'aide d'une caméra haute définition de 24 images/secondes (BASLER A622f, cf. "[http ://www.baslerweb.com/](http://www.baslerweb.com/)"). Une plaque de diffusion de lumière est placée sur le fond de la zone d'étude (i.e. l'arrière plan de la caméra). Deux projecteurs LED (d'une puissance de 500 W chacun) illuminent cette plaque afin d'assurer un bon contraste entre le corps de l'anguille et l'arrière plan du champ de la caméra. Chaque vidéo enregistrée est ensuite transformée en séquence d'images.

Après l'enregistrement, divers algorithmes de traitements d'images seront utilisés, tel que par exemple un algorithme d'analyse de forme. Ces algorithmes, développés sous MATLAB 2011R

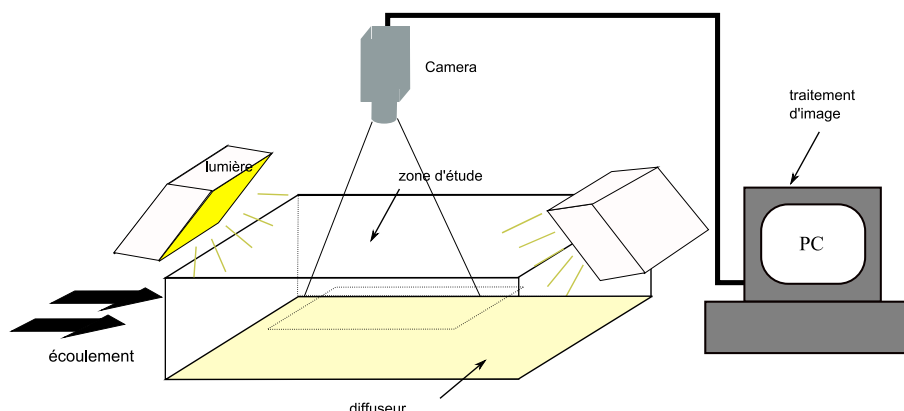


FIGURE 1.7 – Illustration de la technique d'acquisition de vidéo et de traitement d'image

(environnement Mathworks) seront présentés plus en détails le moment venu, c'est à dire dans le chapitre 2 de ce manuscrit.

1.3.2 Mesure des forces hydrodynamiques

Dans certaines études expérimentales et notamment celles présentées dans les chapitres 5 et 6, nous avons été amenés à réaliser des mesures de forces hydrodynamiques s'appliquant sur un corps immergé dans le banc expérimental. Nous avons choisi un capteur de force multiaxes (RFS 150 XY, cf. "<http://www.honigmann.com>"), qui permet de mesurer simultanément la trainée (i.e. la force exercée dans le sens de l'écoulement) et la portance (i.e. la force exercée dans la direction perpendiculaire à l'écoulement). La plage maximale de mesure est de 5 N suivant les deux axes avec une incertitude de ± 0.001 N. La chaîne de mesure est composée d'un ordinateur de table et d'un système d'acquisition de données « National Instruments ». Nous avons développé le programme d'acquisition sous le logiciel LABVIEW (environnement National Instruments). La fréquence ainsi que le nombre d'échantillonnage sont réglables par l'utilisateur. Le programme affiche et enregistre les deux composantes de la force en temps réel. Enfin, tous les échantillons de mesures sont exportés et traités sous MATLAB 2011R, en fonction de chaque application.

1.3.3 Vélocimétrie par Images de Particules

La Vélocimétrie par Image de Particules (ou en anglais *Particle Image Velocimetry*) est une technique de mesure de vitesse précise, non-intrusive, instantanée et bidimensionnelle et de bonne résolution spatiale. Elle est apparue avec le développement de traitement d'images digitales en début de l'année 1980. Son principe de base repose sur le suivi temporel des traceurs (particules introduites dans le fluide, naturelles, fumée...) entre deux instants successifs. La corrélation de deux images successives permet d'obtenir le champ de vitesses du fluide entre ces deux instants (i.e. champ de vitesses instantanées).

Pour obtenir un champ de vitesse par PIV, plusieurs étapes sont nécessaires. Tout d'abord, l'écoulement estensemencé de petites particules ayant presque la même densité que celle de la

particule fluide. Dans notre cas nous avonsensemencé l'eau par des particules de polyamides de $25\ \mu\text{m}$ de diamètre. Afin d'assurer une distribution homogène de particules dans l'eau, les particules sont préalablement mélangées avec de l'eau dans un petit réservoir et ensuite, sont introduites dans le tunnel pendant que l'écoulement circule à vitesse maximale. La quantité de particules ensemencées dépend de chaque application et de la nature de l'écoulement à mesurer. Ensuite, une nappe laser éclaire les particules dans le plan de l'écoulement étudié. La nappe a une épaisseur réglable de 1 à 4 mm. Une caméra placée perpendiculairement par rapport au champ laser assure l'enregistrement des images des particules illuminées en fonction du temps. Une photographie de l'installation est donnée dans la figure 1.8.



FIGURE 1.8 – Photographie du banc d'essai instrumenté pour effectuer des mesures PIV.

Le schéma de la figure 1.9 illustre les étapes de calculs effectuées avant d'obtenir le champ des vecteurs vitesses. Chaque image est divisée en fenêtres d'interrogation (sur toute l'image) à l'intérieur desquelles un vecteur de vitesse est calculé par corrélation (fenêtre de même position entre deux images). La dimension de ces fenêtres (en pixels) est choisie par l'utilisateur selon chaque application. La fonction "cross-correlation" détermine le vecteur de déplacement moyen des particules contenues entre la fenêtre I_1 à l'instant t et la fenêtre I_2 à l'instant $t + \delta t$.

$$C(\Delta X, \Delta Y) = \iint_{\text{fenêtre}} I_1(x, y) I_2(x - \Delta X, y - \Delta Y) dx dy \quad (1.1)$$

Le vecteur de déplacement moyen $\overrightarrow{\Delta X}$ des particules correspond au couple $(\Delta X, \Delta Y)$ dont la corrélation croisée $C(\Delta X, \Delta Y)$ présente un pic. En divisant par le temps δt on obtient la vitesse moyenne des particules du couple de fenêtres d'interrogation (I_1, I_2) .

La taille de la fenêtre d'interrogation dépend de la nature de l'écoulement à mesurer. Nous avons utilisé en général une taille de 32×32 pixels pour notre fenêtre d'interrogation, sauf dans les expériences relatives au chapitre 5 où des vortex sont présents dans l'écoulement, pour lesquelles

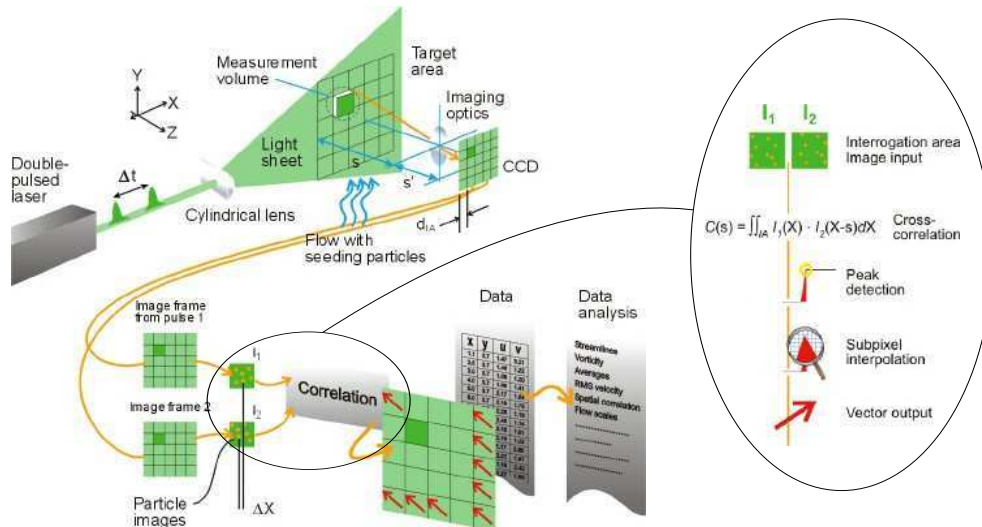


FIGURE 1.9 – Schéma explicatif du calcul du champ de vitesses par la méthode PIV. D'après "www.dantecdynamics.com".

la taille a été réduite de moitié (16 x 16 pixels) afin d'augmenter la résolution spatiale et d'éviter les pertes d'informations sur l'écoulement.

Les calculs PIV ainsi que les post-traitements des champs de vitesses sont réalisés par le logiciel commercial *DynamicStudio 3.0* de la société DantecDynamic.

Matériels utilisés pour la PIV

Nous avons utilisé un système PIV à une fréquence d'acquisition de 15 Hz. Le laser utilisé est un laser newWave Solo à impulsion Nd-YaG (Neodymiumdoped Yttrium Aluminium Garnet) de longueur d'onde de 532 nm, pulsé à 15 Hz et d'une puissance de 120 mJ. Le laser est fixé sur un système de déplacement motorisé, selon deux directions perpendiculaires entre eux.

Une caméra "HiSense" CCD est utilisée pour l'enregistrement des images, elle est cadencée à 15 Hz en mode double buffer, équipée d'un objectif à 50 mm de distance focale, et de résolution 1200 x 1600 px. Un exemple de deux images successives de particules est présenté sur la figure 1.10.

Une carte Dantec permet d'assurer la synchronisation des pulses lasers avec les doublés d'images pris par la caméra. De plus, cette carte permet d'imposer le temps δt entre les images, qui doit être adapté¹ à la vitesse de l'écoulement. Ainsi, la cadence d'acquisition d'image est limitée à 1/15 Hz, par contre, l'intervalle de temps δt peut être trop court, cela permet d'accéder à des vitesses importantes de l'écoulement.

1. Il faut que les particules parcourent environ 4 px sur l'image pendant δt , afin d'assurer une bonne fonction d'inter-corrélation

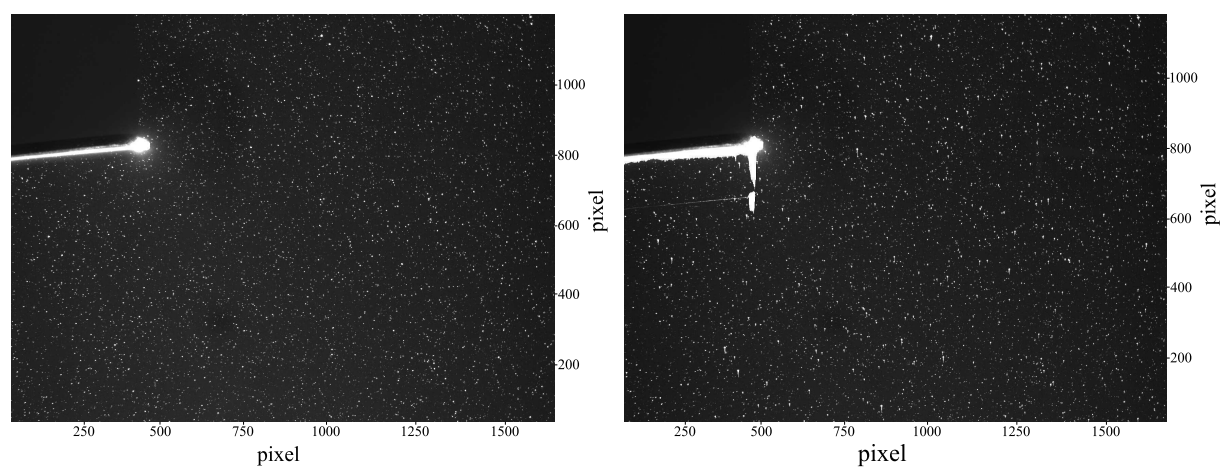


FIGURE 1.10 – Exemple de couple d'images issu de la caméra CCD à partir duquel un champ de vitesse est calculé par la méthode de la PIV.

Chapitre 2

Étude et caractérisation de la nage d'une anguille réelle

2.1 Introduction

Comme mentionné en introduction générale, l'une des particularité du robot ANGELS, est la reconfigurabilité. Par ce terme, il est entendu que chacun des modules élémentaires, dont les caractéristiques hydrodynamiques ont par ailleurs été également étudiés dans cette thèse (chapitre 5), puisse se regrouper les uns à la suite des autres, de manière à former *in fine* un robot anguilliforme. Dans cette configuration, que l'on a qualifié de "regroupée", il est donc prévu que le mode de propulsion adopté par le prototype soit basé sur la nage dite anguilliforme.

Ce chapitre a pour objectifs d'observer, puis de caractériser à l'aide d'un modèle mathématique corrélatif, les allures de nage (i.e. les lois de déformations du corps) d'une anguille naturelle placée dans un écoulement uniforme. En particulier, ce travail permettra aux automaticiens du projet d'imposer au prototype des lois de commandes bio-inspirées lorsqu'il évolue dans cette configuration.

Ce chapitre est composé de deux parties. Dans la première, une étude bibliographique un peu généraliste de la nage est proposée et qui se terminera par une analyse un peu plus approfondie des travaux portant spécifiquement sur la nage anguilliforme. Dans la deuxième partie, nous présenterons les modalités d'expérimentations et détaillerons les résultats obtenus.

2.2 Généralités sur la nage

L'efficacité de la nage des poissons dans leur environnement a fait l'objet de multiples réflexions de la part des chercheurs (biologistes ou autres) depuis de très nombreuses années. Dans les années 1935, le biologiste J. Gray, qui cherchait à déterminer la puissance musculaire développée par les dauphins lors de leurs déplacements, a établi qu'en théorie cette dernière ne leurs permettait pas d'atteindre les vitesses de croisière habituellement observées, i.e. autour de 45

km/h (voir Gray 1935). Cette contradiction apparente est connue de nos jours sous le nom de « paradoxe de Gray ». Depuis lors, d'autres chercheurs ont observé qu'en plus d'une efficacité énergétique remarquable, certains poissons (tel que le brochet par exemple) pouvaient atteindre des accélérations 5 fois supérieures à la gravité terrestre, leurs permettant d'atteindre des vitesses de pointe de près de 40 nœuds (Triantafyllou et Triantafyllou 1995). D'autres poissons (telle que l'anguille), sont capables grâce à leur morphologie, d'effectuer de longs trajets migratoires de plusieurs milliers de kilomètres et sur une durée de 7 à 9 mois, cela en dépensant un minimum d'énergie (Colombier *et al.* 2007).

Ces résultats forts témoignent de l'efficacité de la nage des poissons, et c'est donc naturellement que ces derniers ont constitué une source d'inspiration pour les "bio-roboticiens".

Notons que de manière générale, la nage est un sujet d'étude extrêmement riche et la littérature scientifique portant sur le sujet est vaste. Le lecteur intéressé pourra, s'il le souhaite, se référer aux articles de synthèse proposés, par exemple, par Sfakiotakis *et al.* (1999), Triantafyllou *et al.* (2000), Sparenberg (2002), Colgate et Lynch (2004) ou encore Blake (2004).

2.2.1 Mode de propulsion ondulatoire

Pour se mouvoir, la plupart des poissons propagent une onde le long de leurs corps, de la tête vers la queue, générant ainsi une force de propulsion. Cependant, les caractéristiques de l'onde ainsi propagée diffèrent suivant les espèces et en particulier selon leurs morphologies. Ces différences ont amené les biologistes tels que Breder (1926), ou Webb (1988) (voir aussi l'ouvrage de Blake 1991), à établir une classification générale des espèces en fonction de ce critère, qui regroupe les catégories suivantes :

- Anguilliforme : inspiré de l'anguille, cette appellation est utilisée pour les poissons qui font onduler une grande partie de leurs corps au cours de la propulsion (Gray 1933 ; Gillis 1996).
- Tunniforme : inspiré du poisson tunas, ce terme désigne la locomotion des poissons dont la propulsion est basée en grande partie sur le mouvement de la queue dont l'ondulation reste relativement faible (Donley et Dickson 2000 ; Graham et Dickson 2004).
- Carangiforme et Subcarangiforme : la différence entre ces deux catégories, est que, dans la nage carangiforme la partie du corps qui ondule durant la propulsion est plus grande que pour les poissons de type Subcarangiform mais toutefois plus petite que celle de l'anguilliforme.

La figure 2.1, tirée de Lauder et Tytell (2005), illustre les principes de ces catégories de nages, caractérisées par des amplitudes et des zones d'ondulations différentes le long du corps.

Pour établir cette classification, les auteurs (Lauder et Tytell 2005) se sont basés sur des observations relativement récentes de poissons nageant, dans des conditions d'écoulements bien contrôlées, à des vitesses comprises entre 1.6 et 1.8 longueurs du corps/seconde (L/s) et de tailles comprises entre 20 à 25 cm. Ils ont constaté que lorsque la vitesse de la nage s'élevait à des vitesses de l'ordre de 1.8 L/s, les allures étaient similaires pour les quatre catégories, à l'exception de la

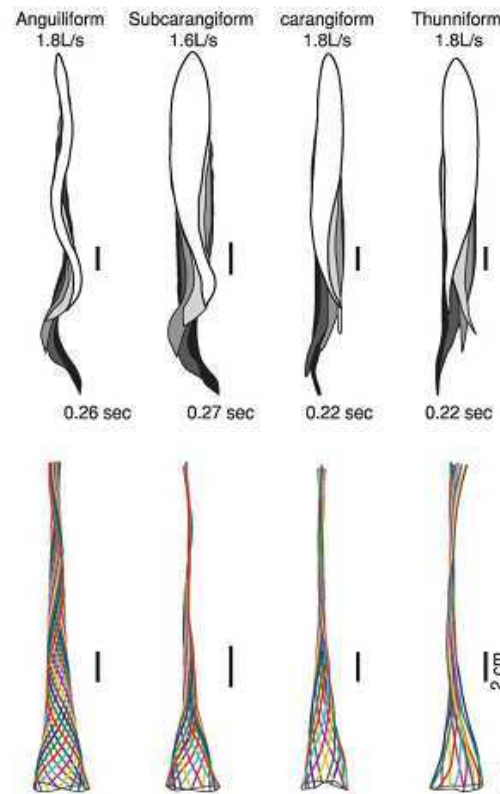


FIGURE 2.1 – Les quatre catégories classiques du mode de propulsion ondulatoire illustrées par Lauder et Tytell (2005).

nage anguilliforme qui présente une oscillation latérale importante, développée sur une grande partie du corps (i.e. 80% du corps est déformé). La génération d'une propagation d'onde sur une grande partie du corps, distingue donc les poissons anguilliformes de leurs homologues, notamment, en termes d'efficacité de nage et de manœuvrabilité.

2.2.2 Nage anguilliforme

La plupart de nos connaissances sur la nage anguilliforme, découlent principalement du travail pionnier mené par Sir J. Gray (Gray 1933) sur la nage d'une anguille européenne, décrivant le mouvement du corps comme une propagation d'onde d'amplitude variable de la tête vers la queue et de vitesse croissante, supérieure à la vitesse de nage. Ces travaux ont constitué une source d'inspiration pour des nombreuses études postérieures, qui ont apporté de nouveaux éléments, permettant de mieux comprendre ce mécanisme de nage. A titre d'exemple, Gillis (1996) a montré que les paramètres caractérisant le mouvement de déformation du corps sont en réalité plus complexes que ceux préconisés par Gray, et que d'autres effets peuvent avoir influence sur la nage, tels que, la vitesse, l'environnement et la différence morphologique.

Peu après, D'Aout et Aerts (1999) ont effectué une étude comparative entre deux méca-

nismes de nage pratiqués par l'anguille : nage en avant et nage en arrière. Dans cette étude, ils considèrent que l'anguille utilise le mécanisme de nage en arrière lorsqu'elle se déplace dans des milieux obscurs et complexes. Dans ce cas, le déplacement latéral de la tête est important et l'ondulation de la partie supérieure du corps (vers la tête) présente une rotation plus faible que dans l'ondulation de la partie postérieure. Ce mécanisme présente plusieurs inconvénients, notamment, la contraction musculaire élevée dans la partie antérieure du corps, mais toutefois présente un avantage par rapport aux autres catégories de nage. D'autres travaux, portent sur l'effet de l'environnement sur le mouvement de déformation adopté par l'anguille. Gillis (1998) a observé, suite à une étude expérimentale, que dans un environnement terrestre l'amplitude d'oscillation latérale du corps est plus importante que lors du déplacement dans un milieu fluide. Dans ce cas, plusieurs ondes dissociées se propagent simultanément le long du corps et l'anguille suit un chemin semblable à celui suivi par les serpents (voir Jayne 1986). Des études se sont focalisés sur la nage dans des conditions extrêmes, à titre d'exemple, les manœuvres effectuées lors d'un changement brusque de direction de nage et lors de l'action pour saisir sa proie (voir le papier de review publié par Domenici et Blake 1997). D'autre travaux se sont intéressés aux effets de plusieurs caractéristiques physiques, telles que la vitesse (Tytell 2004a) ou l'accélération (Tytell 2004b), sur les paramètres qui décrivent le mouvements du corps lors de la nage.

Dans la plupart des études expérimentales, et d'une façon générale, la déformation du corps de l'anguille lors de la nage est présentée comme une propagation d'onde symétrique par rapport à l'axe de déplacement du corps. En réalité, il semblerait que cela ne soit valable que pour deux conditions : la nage libre (dans un fluide au repos) et la nage face à un écoulement à vitesse contrôlée. Dans la suite, nous attribuons à ce mouvement l'expression suivante : la nage axiale ou la nage par ondulation axiale. Parmi les descriptions mathématiques de la nage anguilliforme existantes dans la littérature, nous avons choisi de prendre comme référence pour cette étude celle fournie par Tytell (2004a), utilisée dans des nombreuses travaux (Tytell 2004b, Porez 2007, Munk 2008, Bergmann et Iollo 2011). La loi fournie par Tytell décrit la position latérale du corps en fonction d'un système de coordonnées liées au corps et au temps, dont l'équation mathématique corrélative se présente comme suit (Tytell 2004a) :

$$y(s, t) = A_m e^{\alpha(\frac{s}{L}-1)} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(s - Vt)\right), \quad (2.1)$$

où s est la coordonnée curviligne le long de la ligne médiane du corps, A_m l'amplitude de déplacement maximal de la queue, α le coefficient d'accroissement de l'amplitude, L la longueur du corps, λ longueur d'onde, t le temps et V la vitesse de propagation de l'onde (voir figure 2.2).

La figure 2.2 montre un schéma représentatif du mouvement d'oscillation axiale du corps de l'anguille à deux instants différents. Ce mouvement est une fonction sinusoïdale périodique où l'amplitude varie exponentiellement de la tête vers la queue.

Après ce bref résumé bibliographique sur la nage anguilliforme, nous poursuivons ce chapitre par la présentation de la méthodologie expérimentale mise en place ainsi que les résultats obtenus.

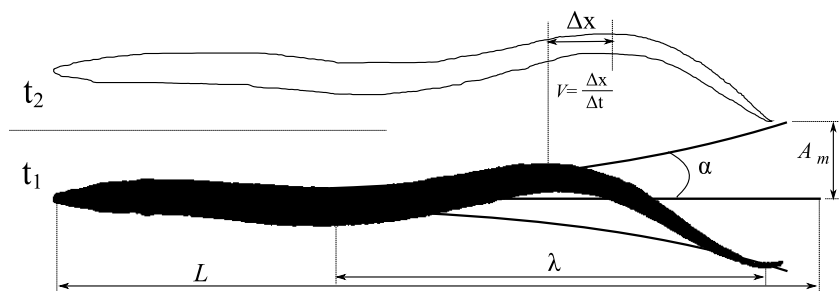


FIGURE 2.2 – Schéma représentatif de l'ondulation axiale du corps de l'anguille et des différents paramètres cinématiques de l'équation 2.1.

2.3 Expérimentation sur la nage de l'anguille Européenne

Nous avons effectué nos expériences sur des anguilles réelles provenant du Lac du grand-lieu en pays de la Loire, Nantes (France). Nous les avons choisies d'une taille variant entre 25 à 45 centimètres. Au total, les expériences ont été réalisées sur six anguilles, réparties sur une durée de 3 semestres : décembre de l'année 2010, juin de l'année 2011 et novembre de l'année 2011. Durant la première période d'expérimentation (décembre de l'année 2010), nous avons été confrontés à une difficulté, à savoir que l'anguille refusait de nager. Ce genre de problème était attendu, mais, malgré nos efforts et pendant plusieurs jours d'expérience, l'anguille persistait à ne pas nager. Cette première série d'expérience a donc été abandonnée et plusieurs hypothèses, tels que la taille de l'anguille et la phase de son cycle de vie ou encore, son état d'adaptation à ce nouvel environnement, ont été émises afin d'identifier la cause de ce problème majeur. En tenant compte de ces hypothèses, et en choisissant des anguilles de tailles plus petites, les deux autres séries d'essais (effectuées en juillet 2011 et novembre 2011) ont finalement été réalisées avec succès. A noter qu'après chaque essai, les anguilles ont été remises dans leur milieu naturel.

2.3.1 Méthodologie expérimentale

La méthodologie expérimentale mise en place pour cette étude a été inspirée des celles utilisées par Müller *et al.* (2001), Tytell (2004a) et Tytell et Lauder (2004) ou encore Munk (2008), dans la réalisation de leurs travaux.

Instrumentations et méthodes

L'instrumentation utilisée pour la réalisation de ces essais est illustrée sur la figure 2.3, représentant la zone d'étude utilisée du banc d'essai, et la figure 2.4 qui représente le schéma de la procédure expérimentale mise en place.

La section de travail est composée de deux éléments : une cage en forme parallélépipédique de 1.5 m x 0.5 m x 0.25 m et un système d'acquisition vidéo.

La cage est conçue pour confiner l'anguille dans un volume de contrôle restreint, afin d'éviter qu'elle ne se mette dans le fond de l'aquarium proche de la turbine, et permet de limiter le champ

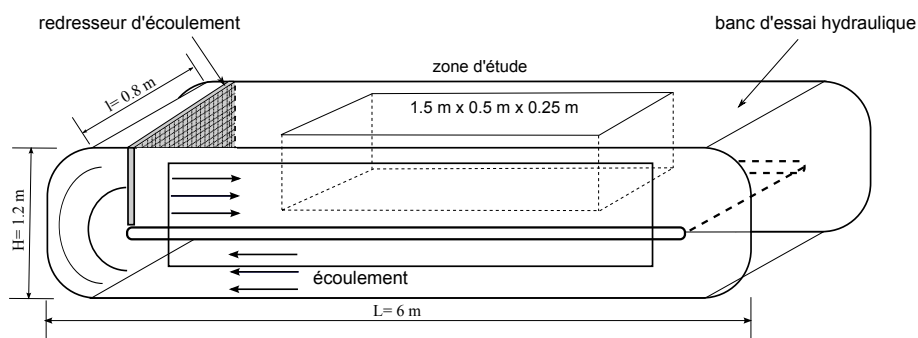


FIGURE 2.3 – Le banc d'essai et la zone d'étude.

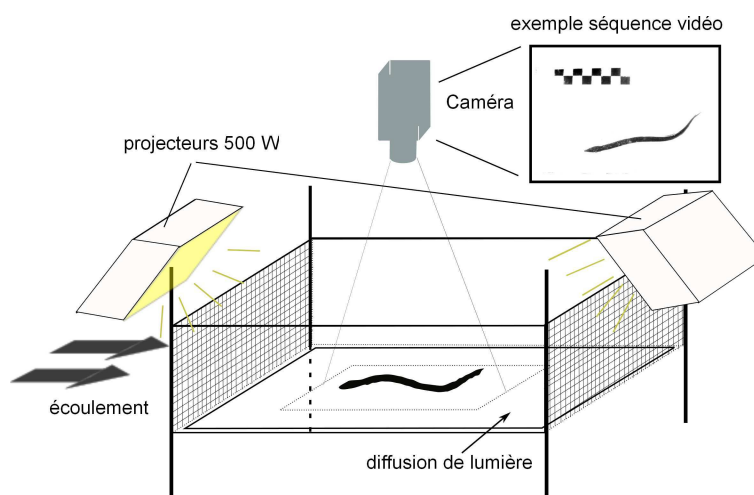


FIGURE 2.4 – Procédure expérimentale : la silhouette de l'anguille est filmée à l'aide d'une caméra à 24 images/seconde.

d'investigation. Les deux surfaces de la cage exposées à l'écoulement sont constituées d'une grille fine d'un maillage carré de $0.008\text{ m} \times 0.008\text{ m}$. Les autres surfaces sont des plaques de matière plastique transparente (plexiglas PMMA), d'épaisseur 0.005 m .

La caméra est fixée perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Le système d'éclairage projette de la lumière de part et d'autre de la zone d'étude à l'aide de deux projecteurs d'une puissance de 500 W chacun. Ils sont inclinés à 45° et éclairent une plaque réfléchissante posée sur la surface inférieure de la cage. La lumière est reflétée par la nappe, ce qui permet d'obtenir un bon contraste et de visualiser le corps de l'anguille en arrière plan de la vidéo (voir figure 2.4). La figure 2.5 montre trois photographies du dispositif expérimental : (a) photographie de la cage en dehors de l'aquarium et deux photographies de l'anguille (c) et (d) nageant contre l'écoulement.

Observation de la nage de l'anguille

Pour parvenir à réaliser nos expériences, nous avons observé que plusieurs facteurs avaient de l'influence sur le comportement des anguilles. En conséquence, un plan d'expérimentation a été

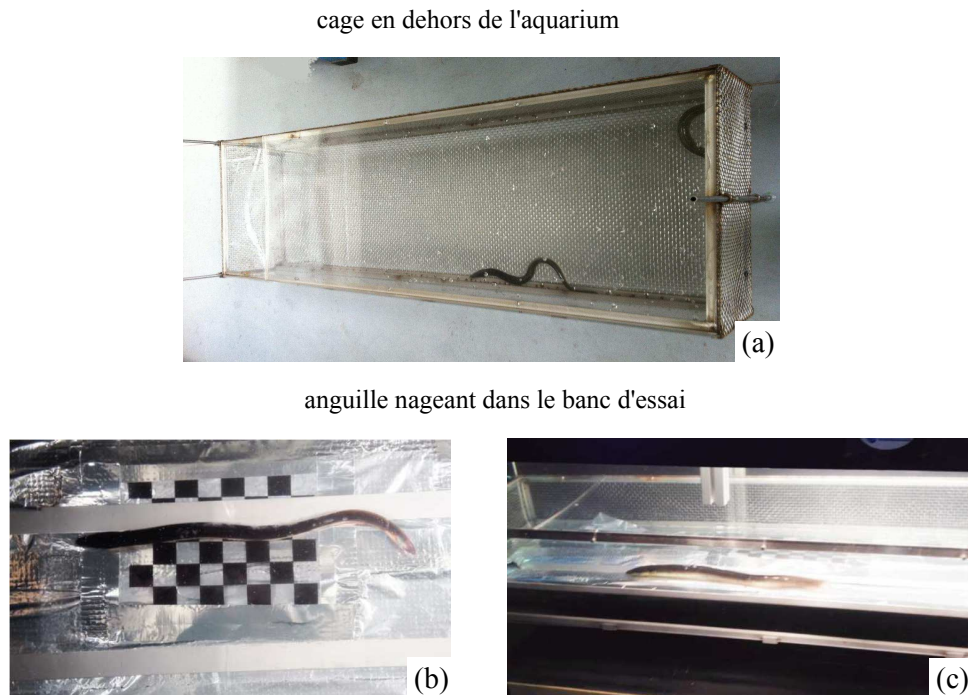


FIGURE 2.5 – Photographie de la cage en dehors du banc d'essai (a) et photographies de l'anguille nageant dans le banc d'essai (b) et (c).

élaboré et suivi pour l'ensemble de cette étude, qui consiste à suivre les étapes suivantes :

- Dans un premier temps, l'anguille est placée dans l'aquarium (dans un fluide au repos) au moins six heures, dans le noir total, avant de démarrer l'expérimentation. Cela afin qu'elle s'acclimate à ce nouvel environnement.
- Dans un deuxième temps, nous démarrons la turbine, en augmentant progressivement la vitesse, tous en gardant la zone d'étude dans le noir total.
- Dix minutes après l'établissement de l'écoulement dans la zone d'étude, nous allumons les projecteurs (d'une façon discontinue) dans le but d'inciter l'anguille à se déplacer, en effet, l'anguille est un poisson lumiphobe.
- Enfin, lorsqu'on observe une probable sequence de nage de l'anguille nous laissons les projecteurs allumés en continue et nous filmons la nage.

Neuf séquences de nage ont été sélectionnées pour être analysées à l'aide d'un algorithme de traitement d'images développé sous l'environnement Mathworks - Matlab R2011a.

Acquisitions de vidéos et traitements d'images

Après l'enregistrement de la vidéo, chaque séquence est traitée afin de transformer une image qualitative de la déformation du corps en un résultat quantitatif sous forme de coordonnées au cours du temps.

Pour commencer, chaque vidéo est dissociée en séquence d'image. Nous présentons sur la figure 2.6 une sélection de cinq images dissociées à partir d'une vidéo de nage enregistrée.

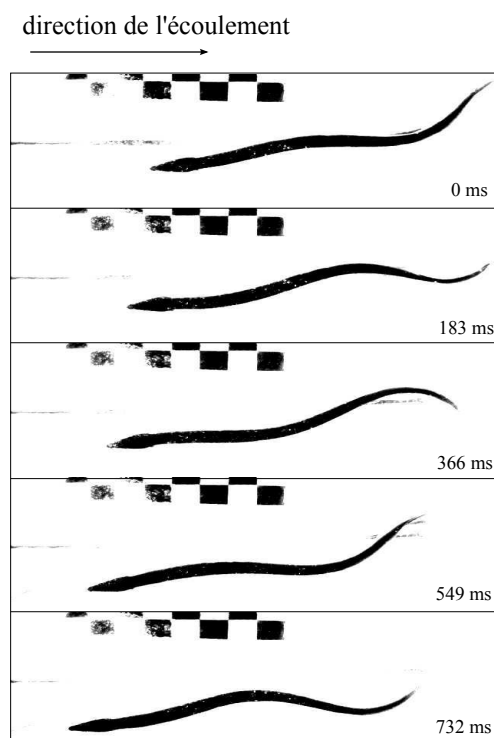


FIGURE 2.6 – Photographie de la nage d'une anguille naturelle durant une période de nage complète.

Chaque séquence d'image sélectionnée présente au moins une période de nage complète (i.e. deux déplacements maximal de la queue). Les images sont ensuite binarisées afin d'obtenir le corps de l'anguille (en couleur noire) sur fond blanc. Cette étape peut être délicate si on ne tient pas en compte, dès le départ, du réglage du contraste de l'arrière plan du champ de la caméra. Pour obtenir les lignes médianes du corps à chaque instant, nous appliquons la "squelettisation" sur chaque image. La squelettisation est une classe d'algorithme utilisée en analyse de forme. Elle consiste à réduire une forme en un ensemble de courbes appelées alors "squelette".

Définition rapide du principe de squelettisation (voir figure 2.7) :

Considérons un ensemble continu X et sa frontière $\partial(X)$; un point x de X appartiendra au squelette de X , noté $S(X)$, s'il existe un cercle centré en x inclus dans X et touchant $\partial(X)$ en deux points au moins.

D'une manière formelle, si en chaque point du squelette $S(x)$, on dessine le cercle de taille maximale correspondant, l'union de ces cercles reconstitue l'objet de départ et l'enveloppe des cercles formera le bord de l'objet. Le processus de traitement d'image est présenté sur le schéma de la figure 2.8.

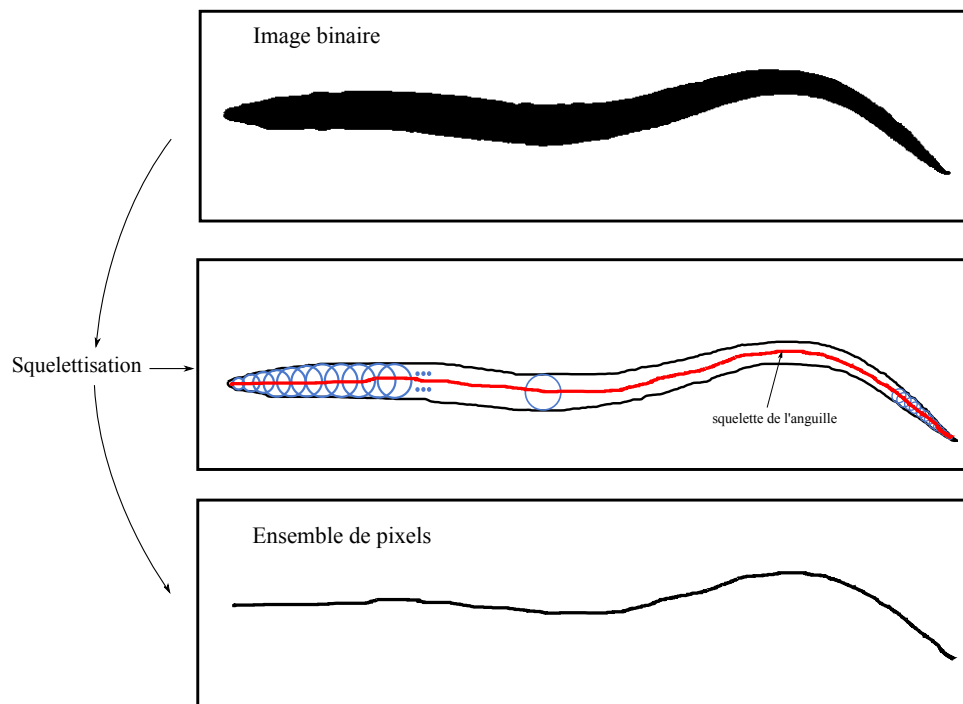


FIGURE 2.7 – Principe de squelettisation.

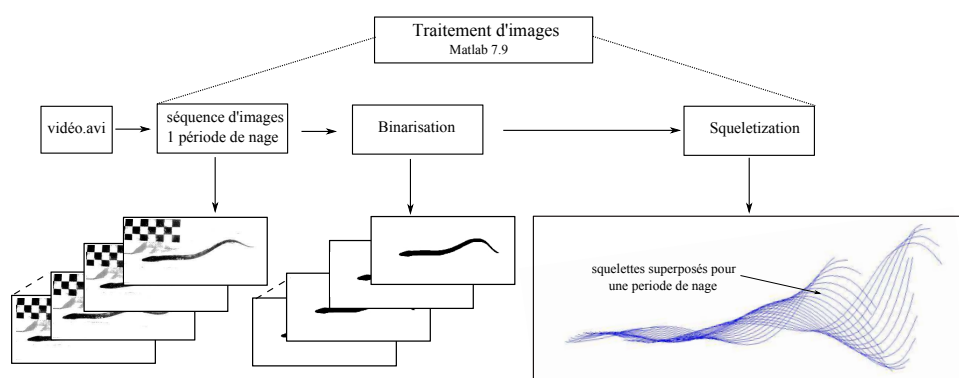


FIGURE 2.8 – Schéma de l'algorithme de traitement d'image.

Identification des paramètres du modèle de déformation du corps

A l'issue du traitement d'image, la séquence de nage est enregistrée sous forme d'un tableau à trois dimensions $SQL[m, 2, n]$ (m est le nombre de pixels du squelette et n nombre de squelettes par période de nage). Le tableau double $SQL_n[m, 2]$ stocke les coordonnées du corps de l'anguille dans le référentiel fixe (x, y) (de fonction $y_{exp} = f(x, t)$ pour $t = t_n$). La superpositions des squelettes pour une séquence de nage complète, sur le même référentiel (x, y) , donne l'exemple présenté sur la figure 2.9 (en haut du schéma).

Maintenant, pour identifier les paramètres d'un modèle mathématique corrélatif, estimé comme étant celui qui décrit la déformation du corps, nous effectuons une analyse sur le ré-

sultat obtenu par squeletisation (tableau SQL). Cette analyse consiste en une opération de deux étapes présentées dans le schéma de la figure 2.9.

Premièrement, nous effectuons la suppression des effets liés à la dynamique externe du corps, c'est à dire, le déplacement (translation axiale ou latérale) de l'ensemble du corps dans le milieu fluide. Pour cela, une rotation et une translation de l'ensemble de squelettes sont effectuées. Ensuite, les coordonnées de chaque squelette sont transformées dans l'espace curviligne lié au corps $y_{exp} = f(s, t)$ (s coordonnée de la ligne médiane du corps de la tête $s = 0$ vers la queue $s = 1$).

Ensuite, nous définissons un modèle de déformation du corps, correspondant le mieux aux observations expérimentales, et déterminons ces différents paramètres par le biais de deux analyses : géométrique et corrélative. Pour présenter cette méthode d'analyse, nous allons utiliser, comme exemple de référence, le modèle mathématique décrivant la nage anguilliforme, présenté dans l'équation 2.1. Rappelons que ces paramètres sont les suivants : A_m amplitude maximale d'ondulation du corps, V vitesse moyenne de propagation de l'onde, L longueur moyenne du corps, α coefficient de croissance de l'amplitude le long du corps et λ longueur d'onde du corps.

Les trois constantes A_m , V , L sont obtenues en effectuant une analyse géométrique à partir des coordonnées du corps. Les deux paramètres α et λ sont obtenus à partir d'une méthode basée sur le principe de modélisation par régression non-linéaire à critère de moindre-carré. Cette méthode permet d'estimer les paramètres d'un modèle complexe (fonction logarithmique, exponentielle...) à partir de données expérimentales. Nous définissons comme constantes d'entrées de l'algorithme, les constantes de nage (A_m , V , L) et nous attribuons aux paramètres inconnus $P(\alpha, \lambda)$ une valeur de départ $P_0(\alpha_0, \lambda_0)$. A chaque itération, nous calculons les valeurs prédites du modèle $\hat{y}(s, t)$ et nous calculons le critère des moindres carrés $r^2 = (\hat{y}(s, t) - y_{exp}(s, t))^2$. Lorsque la valeur de r^2 est plus petite que la valeur du seuil égale à 10^{-16} (valeur par défaut), un nouveau jeu de paramètres $\hat{P}(\alpha, \lambda)$ est défini et l'algorithme repart du début. Une fois que la valeur de r^2 vérifie le critère de convergence, la valeur du paramètre P retenue est celle qui est égale à la dernière valeur prédite \hat{P} . Après avoir déterminé les paramètres de nage, les squelettes (i.e. lignes médianes du corps) sont tracés et comparés aux ceux obtenus expérimentalement.

Calibration et validation

Pour valider la procédure expérimentale mise en place, nous avons sélectionné une séquence de l'anguille nageant face à un écoulement uniforme, pour l'analyser, puis la comparer aux travaux réalisés par Tytell (2004a) (cas de référence). On présente, sur la figure 2.10, quelques clichés (images binarisées) de la vidéo de nage, représentant une période complète de battement de la queue (séquence complète de 21 images).

Ensuite, nous avons analysé cette séquence en nous basant sur le modèle mathématique corrélatif de l'équation 2.1, redonné ici :

$$y(s, t) = A_m e^{(\alpha(\frac{s}{L}-1))} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(s - Vt)\right),$$

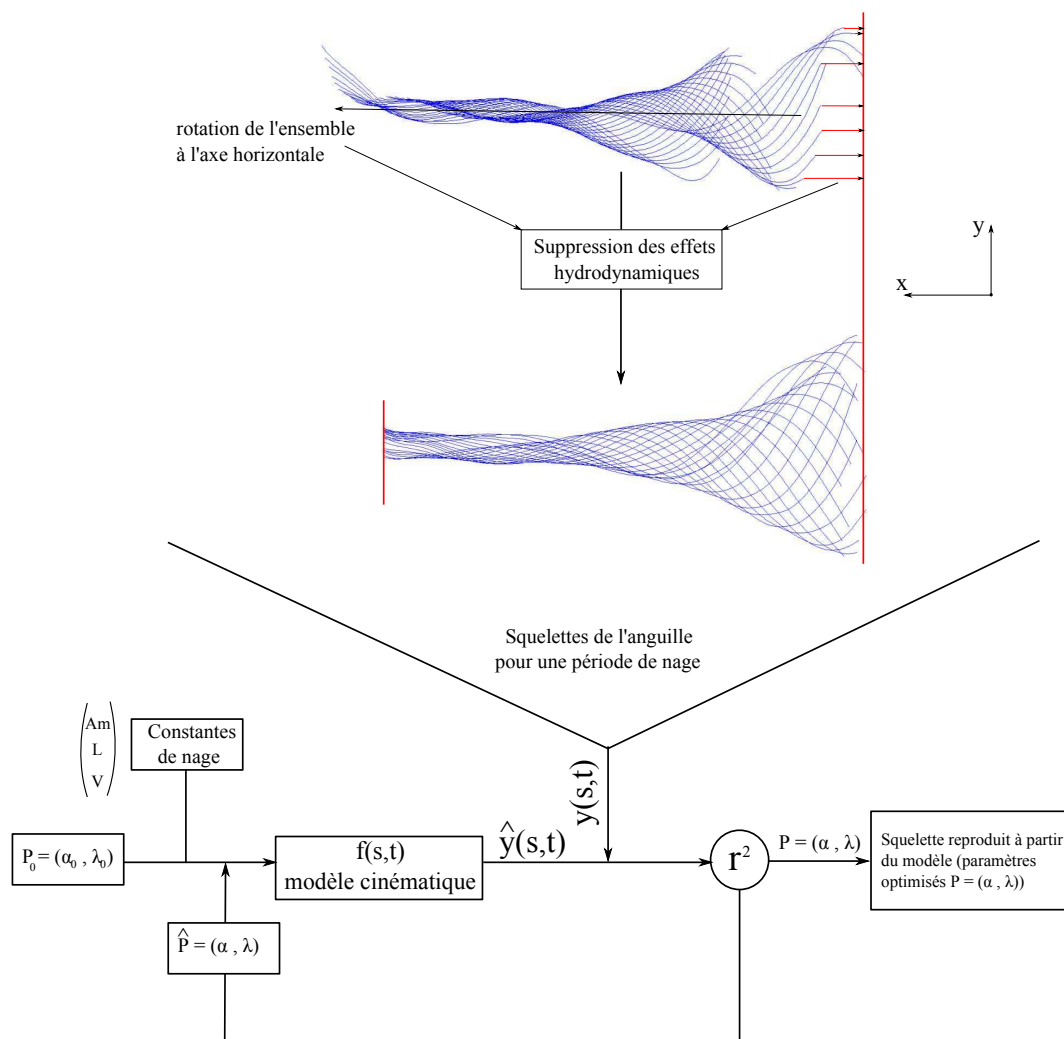


FIGURE 2.9 – Schéma de l'algorithme d'optimisation des paramètres cinématiques.

Après analyse, les paramètres de nage sont référencés dans le tableau 2.1, où, pour comparaison nous référençons également les résultats de Tytell (2004a). Ce dernier ayant effectué des expériences sur une anguille américaine, pour une vitesse de nage qui varie entre 0.5 L/s et 2 L/s. Notons que, toutes les valeurs sont normalisées par rapport à la longueur du corps de l'anguille.

Pour le cas de référence, lorsque la vitesse de nage de l'anguille augmente, l'amplitude maximale du déplacement latérale du corps A_m augmente également, ainsi que la vitesse de propagation de l'onde V . En revanche, le coefficient d'accroissement de l'amplitude α diminue et la longueur d'onde λ reste constante. Dans notre cas (axiale/cas 1), les paramètres obtenus sont en accord avec les paramètres de références, exception faite pour la longueur d'onde. Tytell (2004a) considère que la longueur d'onde ne varie pas en fonction de la vitesse de nage, mais, varie suivant les espèces. Cela explique probablement cette différence, car nous avons effectué les expériences sur la nage d'une anguille européenne.

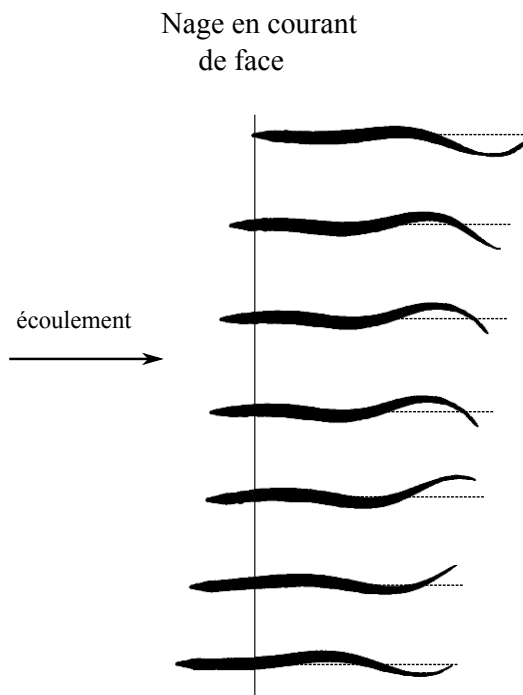


FIGURE 2.10 – Silhouettes médianes représentées sur une demie-période de nage à contre-courant.

TABLE 2.1 – Paramètres cinématiques de la nage axiale : cas de référence (Tytell 2004a) et résultats obtenus.

		U	A_m	V	λ	α
Cas de référence	Min (U)	0.5	0.05	0.877	0.597	3.9
	Max (U)	2	0.08	2.51	0.597	2.25
Résultat obtenu	axiale/cas 1	0.87	0.074	1.13	0.632	2.9

U et V ($BL s^{-1}$), A_m et $\lambda(BL)$

Pour une comparaison qualitative, nous avons reproduit à partir des paramètres obtenus, l'allure de déformation du corps lors de la nage de l'anguille. Les deux séquences, expérimentale et celle modélisée, sont présentées sur la figure 2.11.

Dans les deux graphes, les lignes médianes sont superposées sur une période complète de battement de la queue et la ligne rouge représente l'axe de déplacement du corps. La correspondance qualitative ainsi que quantitative entre les deux allures nous permet donc de valider la méthodologie expérimentale mise en place.

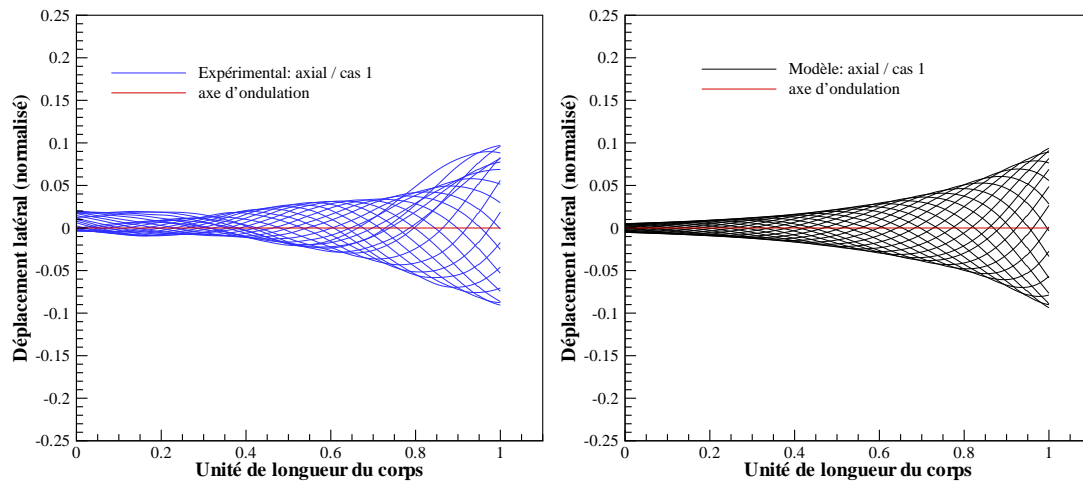


FIGURE 2.11 – *Squelettes de l'anguille superposés pour une période de nage complète. (a) résultat expérimental et (b) résultat obtenu à partir du modèle cinématique décrit par Tytell (2004a) (équation 2.1).*

2.3.2 Résultats et discussion

Les premières observations que nous avons faites concernant la cinématique de l'anguille durant la nage sont en accord, avec la description générale de la nage anguilliforme de Breder (1926). Lorsque l'anguille nage dans un fluide au repos ou dans un courant de face, elle fait onduler son corps symétriquement par rapport à l'axe de nage, avec une amplitude croissante de la tête vers la queue. Mais, lorsqu'elle nage en biais (ou dans un courant traversier) par rapport à la vitesse de l'écoulement, autrement dit, lorsqu'elle nage en formant un angle par rapport à la direction de l'écoulement, elle modifie la propagation de l'onde le long du corps.

La figure 2.12 montre la différence d'ondulation entre les deux types de nages observés. Les silhouettes de l'anguille sont superposées aux axes pointillés représentant la direction de la nage par rapport à l'écoulement.

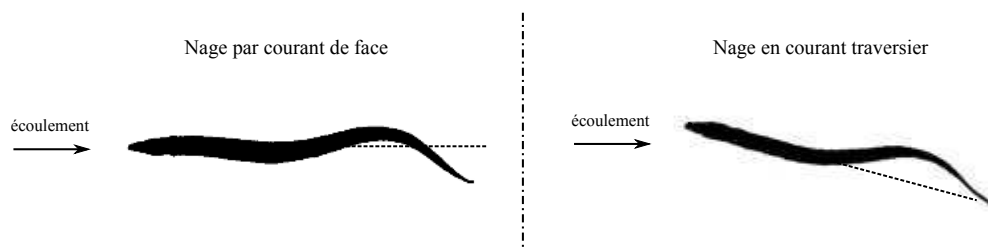


FIGURE 2.12 – *Différence d'ondulation entre la nage à contre courant de face et nage en courant traversier.*

Nous remarquons que dans les deux cas l'anguille présente les mêmes caractéristiques de la nage par propulsion ondulatoire, c'est à dire, qu'il n'y a pas de changement fondamental dans le principe de nage. En revanche, nous pouvons remarquer une différence remarquable entre les deux modes. Dans le cas de la nage à contre courant, l'anguille fait onduler symétriquement son corps de part et d'autre de l'axe de déplacement (ligne pointillée noir), tandis que, dans le cas de la nage dans un courant traversier la distribution de l'amplitude (du déplacement latéral du corps) n'est plus symétrique. Nous avons étudié ce comportement dans le but de fournir une description mathématique de la déformation du corps alors observée.

Extension de la loi de déformation du corps fournie par Tytell (2004a)

Ainsi, comme nous venons de le dire, l'anguille se déplaçait souvent en biais dans la zone d'étude lorsqu'elle nageait contre le courant. Comme montré sur la figure 2.13, l'anguille effectue deux mouvements simultanés : une translation longitudinale dans le sens contraire à la vitesse de l'écoulement et une translation latérale perpendiculaire à ce dernier. De ce fait, nous observons une nouvelle forme d'onde propagée le long du corps, due à la manœuvre effectuée.

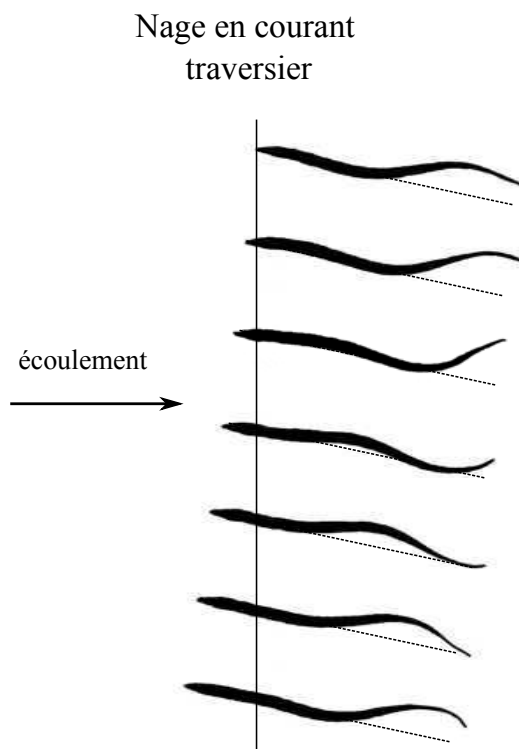


FIGURE 2.13 – *Silhouettes médianes représentées sur une demin-période de nage dans un courant traversier.*

Cette allure de nage est donc analysée et présentée dans ce qui suit. La figure 2.14 présente les squelettes normalisés (par rapport à la longueur du corps) de l'anguille, superposés dans le référentiel fixe (x, y) lié au laboratoire, pour une période complète de battement de la queue.

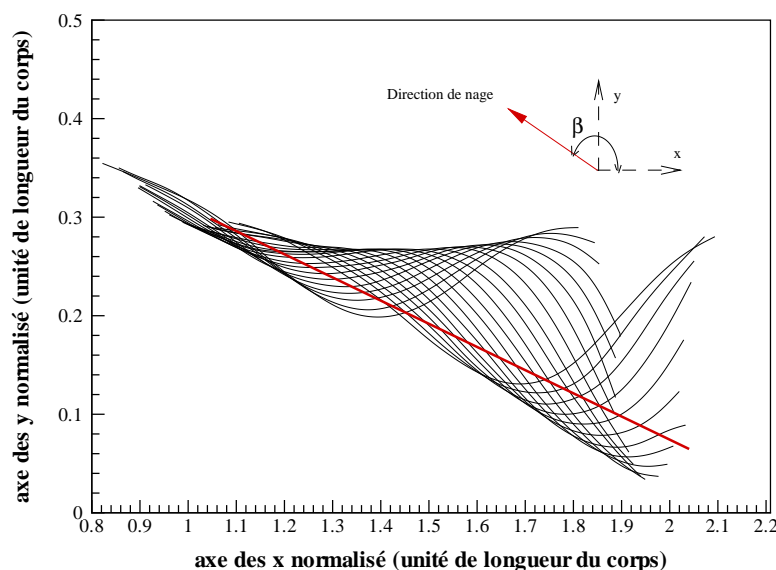


FIGURE 2.14 – *Squelettes de l'anguille (vue de dessus) sur une période complète de nage en biais.*

Nous définissons β l'angle formé entre la direction de nage (ligne rouge) et la direction de l'écoulement (l'axe des x). Nous définissons β^* l'angle spécifique de nage, égal à $\pi - \beta$. Par exemple, dans ce cas (figure 2.14), β^* a été estimé à -14° , soit $\beta = 166^\circ$. Nous remarquons que le déplacement latéral du corps présente une déviation par rapport à l'axe de nage, contrairement à la nage axiale. La distribution de l'amplitude n'est plus symétrique et cette dissymétrie est plus prononcée du côté du corps non exposé à l'écoulement. Cette dissymétrie est plus importante pour un angle de nage plus important. Ce comportement de l'anguille est probablement dû au déséquilibre de la distribution de force d'interaction entre le fluide et le corps. On constate, que suite à l'inclinaison du corps par rapport à la vitesse de l'écoulement, l'anguille a adapté son comportement afin d'équilibrer la force hydrodynamique appliquée par le fluide sur son corps.

D'après l'analyse de ce mode de déformation, nous avons obtenu une description mathématique corrélative basée sur la description fournie par Tytell (2004a). Avant de présenter ce résultat, nous allons présenter l'approche géométrique utilisée.

Approche géométrique

L'idée est de généraliser l'équation 2.1 en une nouvelle équation qui décrit le comportement de l'anguille même lorsqu'elle nage dans un courant traversier. Cette équation ne dérive pas d'un

calcul analytique. Elle est obtenue de manière corrélative.

Pour ce faire, considérons la fonction suivant $f_1(x)$:

$$f_1(x) = A(x) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}x\right), \quad (2.2)$$

où λ_1 est la longueur d'onde et $A(x)$ l'amplitude croissante en fonction de x .

La fonction f_1 oscille symétriquement autour de l'axe $y = 0$ et l'amplitude varie exponentiellement suivant l'axe des x . Rappelons que la seule différence physique observé entre la nage à contre courant et la nage en biais, est la direction relative du déplacement du corps par rapport à la direction de l'écoulement. Alors, on considère que l'angle spécifique de nage β^* est le paramètre géométrique qui influence la déformation du corps. Ce paramètre sera donc intégré à la loi de déformation fournit par Tytell.

En effectuant une modification mathématique à l'équation 2.2, on pose :

$$f_2(x) = A(x) \ln\left(b(\beta^*) + \exp^{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1}x\right)}\right), \quad (2.3)$$

où $b(\beta^*)$ est une constante qui dépend du paramètre géométrique β^* .

Les fonctions $f_1(x)$ et $f_2(x)$ sont tracées sur la figure 2.15. Nous remarquons que, pour la fonction f_2 (courbe rouge), la distribution de l'amplitude n'est plus symétrique par rapport à l'axe $y = 0$, en comparaison avec l'oscillation de la fonction f_1 (courbe noire). La moyenne des points d'inflexion (ligne rouge) a dévié par rapport à la moyenne des points d'inflexion de la fonction f_1 (ligne noire), ce qui correspond à l'axe d'oscillation.

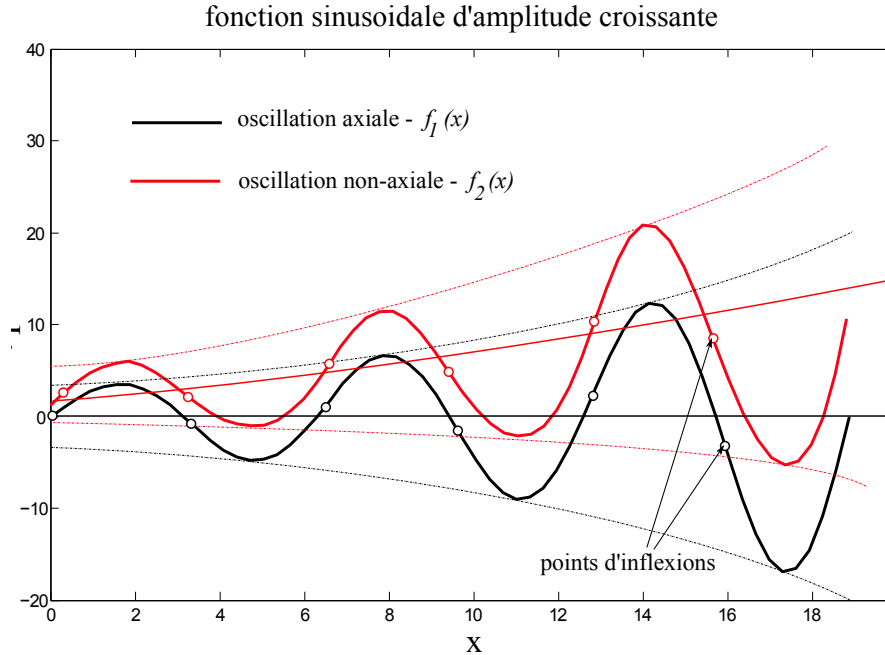


FIGURE 2.15 – Approche géométrique de la différence entre l'oscillation axiale et non axiale.

Cette description correspond au cas de la nage en biais. Pour la généraliser, nous considérons que la constante b est égale à $\sin(\beta^*)$. De ce fait, dans le cas où le paramètre β^* est nul, le

logarithme et l'exponentiel de la fonction f_2 se compensent, ce qui nous ramène à la fonction de référence f_1 .

Notons que cette description n'est valable que lorsque $\sin(\beta^*)$ est positif. Comme la morphologie du corps de l'anguille est parfaitement symétrique, alors le signe de l'angle spécifique de nage n'a aucun effet sur le comportement cinématique. De ce fait, nous introduisons une constante de signe, qui est égale à ± 1 selon le signe de β^* .

Pour finir, la description cinématique généralisée de la nage anguilliforme par ondulation axiale s'écrit sous la forme suivante :

$$y(s, t) = k A_m \exp^{\alpha(\frac{s}{L}-1)} \ln \left(\sin(|\beta^*|) + \exp^{\sin(\frac{2\pi}{\lambda}(s-Vt))} \right), \quad (2.4)$$

où $k = \beta^*/|\beta^*|$ et les paramètres cinématiques de l'équation sont les mêmes que ceux définis dans l'équation (2.1).

Analyse des résultats

La description généralisée de la nage anguilliforme par ondulation du corps nous a permis d'identifier les paramètres impliqués dans la loi de déformation du corps lors de la nage de l'anguille dans un courant traversier. Le modèle décrit dans l'équation (2.4) est donc intégré dans l'algorithme d'optimisation de paramètres afin de déterminer les paramètres de nage. Rappelons qu'avant d'effectuer l'analyse d'optimisation, nous avons supprimé tous les effets hydrodynamiques liés à la dynamique externe du corps. Considérant que le déplacement latéral de la tête est négligeable, l'angle de nage est donc déterminé en effectuant une analyse par régression linéaire pour la première (environ 30 %) partie du corps .

Au total, huit vidéos de nage en biais ont été sélectionnées pour être analysées. Nous présentons toutes ces séquences dans la figure 2.16, sous forme de squelettes superposés pour une période complète de battement de la queue, et normalisés par rapport à la longueur du corps.

Les paramètres obtenus pour chaque séquence de nage sont référencés dans le tableau 2.2. Le but est de vérifier que le modèle généralisé identifié dans ce travail est fidèle aux observations, c'est à dire, que les allures sont comparable à celles observées dans nos expérimentations.

L'angle spécifique de nage β^* en valeur absolu, varie entre 8° et 18° . L'augmentation de l'angle de nage a probablement un effet sur les paramètres cinématiques de la loi de nage. Il est donc important d'étudier la relation qui relie ce paramètre géométrique aux autres paramètres de nage. Mais, cela ne peut pas être effectué dans cette présente étude, vue le faible nombre d'observations. Cette étude sera limitée à l'identification des paramètres et la modélisation des allures de nage pour les comparer aux résultats expérimentaux obtenus.

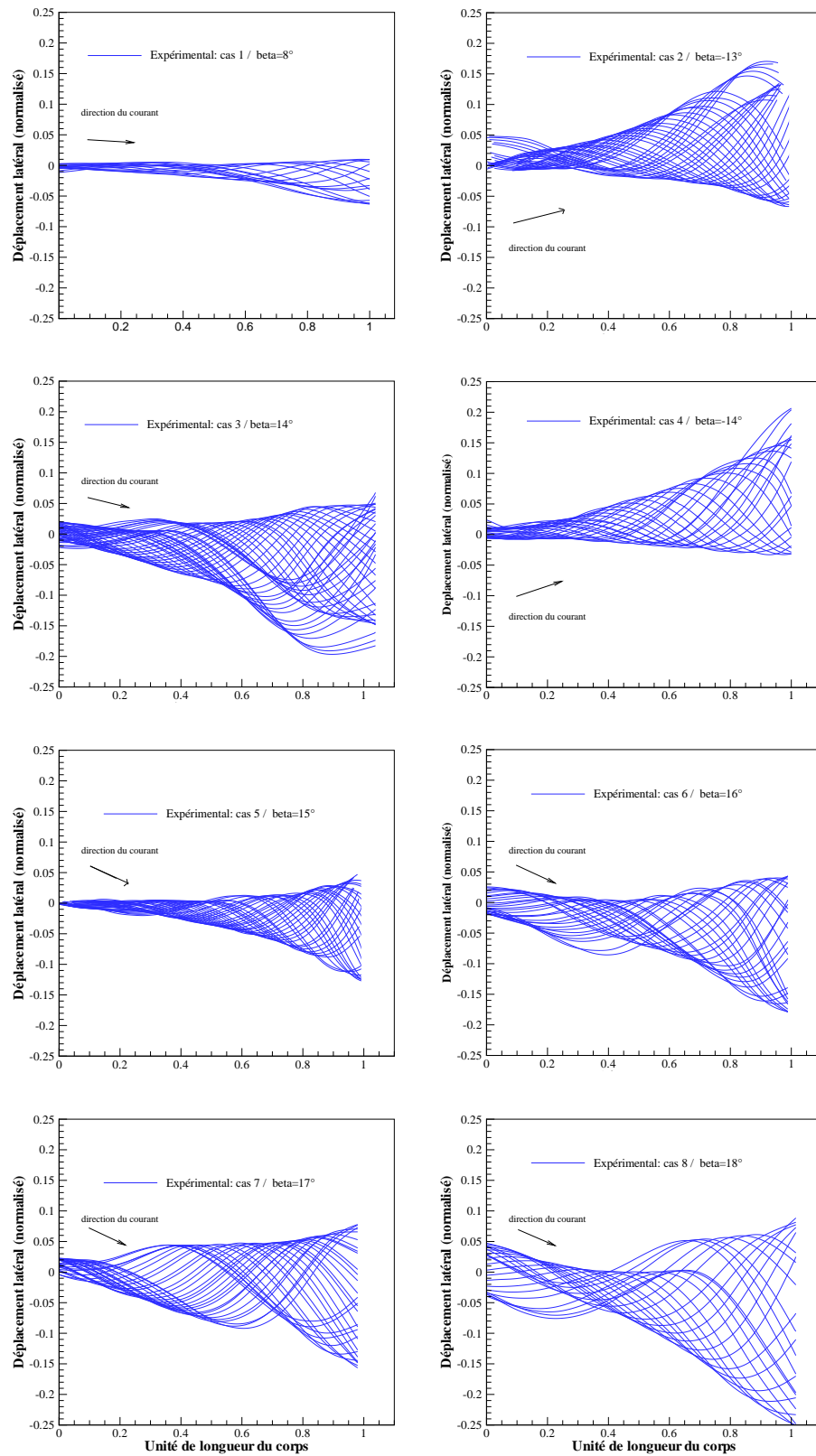


FIGURE 2.16 – Déplacement latéral du corps de l'anguille en fonction du temps. Résultats expérimentaux des squelettes de l'anguille superposés pour une période de nage complète.

TABLE 2.2 – Paramètres cinématiques obtenus à partir du modèle décrit dans l'équation 2.4.

Non-axiale	V	U/V	A_m	β^*	λ	α
cas 1	1.181	0.513	0.042	8°	0.673	2.3
cas 2	1.181	0.565	0.117	-13°	0.697	2.3
cas 3	1.303	0.521	0.096	14°	0.714	2.2
cas 4	1.185	0.511	0.091	-14°	0.649	2.2
cas 5	1.232	0.427	0.059	15°	0.534	2.7
cas 6	0.847	0.786	0.0.072	16°	0.673	2.3
cas 7	1.101	0.606	0.068	17°	0.773	2
cas 8	1.187	0.562	0.086	18°	0.767	2.1
$V \text{ (BL s}^{-1}\text{)}, A_m \text{ and } \lambda \text{ (BL)}$						

Nous avons reproduit les allures de nages de chaque cas du tableau 2.2 à l'aide du modèle généralisé de l'équation 2.4. Ces dernières sont représentées sur la figure 2.17. En effectuant une comparaison qualitatif entre les allures présentées sur la figure 2.16 (expérimental) et leurs associées de la figure 2.17 (modèle), nous remarquons une bonne correspondance.

Pour les mêmes résultats obtenus, nous avons superposé les allures expérimentale et théorique pour les deux cas de nage, en courant de face (axiale) et dans un courant traversier (biais), sous forme de contours (enveloppés) du déplacement latéral du corps. La figure 2.18 montre les contours du déplacement latéral pour différentes positions du corps de la tête vers la queue. Pour la nage axiale (figure 2.18 a), nous avons utilisé la séquence de nage présentée dans la section 2.3.1. Pour la nage en biais, nous avons utilisé le cas 4 présenté dans le tableau 2.2 (figure 2.18 b). Dans chaque graphe, les résultats expérimentaux (contours pointillés) sont superposés aux résultats reproduits à partir du modèle (contours solides). Chaque contour présente une section du corps de l'anguille. La figure 2.18 (c) montre les différentes sections du corps dont les couleurs font référence à chaque contour (de même couleur). Nous constatons, dans les deux cas, une bonne correspondance entre le modèle et les valeurs expérimentales. De plus, la différence entre les deux types d'ondulations est remarquable. Dans le cas de la nage axiale, chaque position du corps présente une oscillation symétrique autour de l'axe $y = 0$ en fonction du temps, alors que dans la nage non axiale, l'oscillation de chaque section du corps dévie (de l'axe $y = 0$) au fur et à mesure de l'éloignement de la tête. Dans les deux cas, l'amplitude d'oscillation est croissante de la tête vers la queue.

La loi de déformation généralisée du corps de l'anguille, fournie dans l'équation 2.4, décrit la position latérale de l'abscisse curviligne lié au corps en fonction du temps. Cette forme de présen-

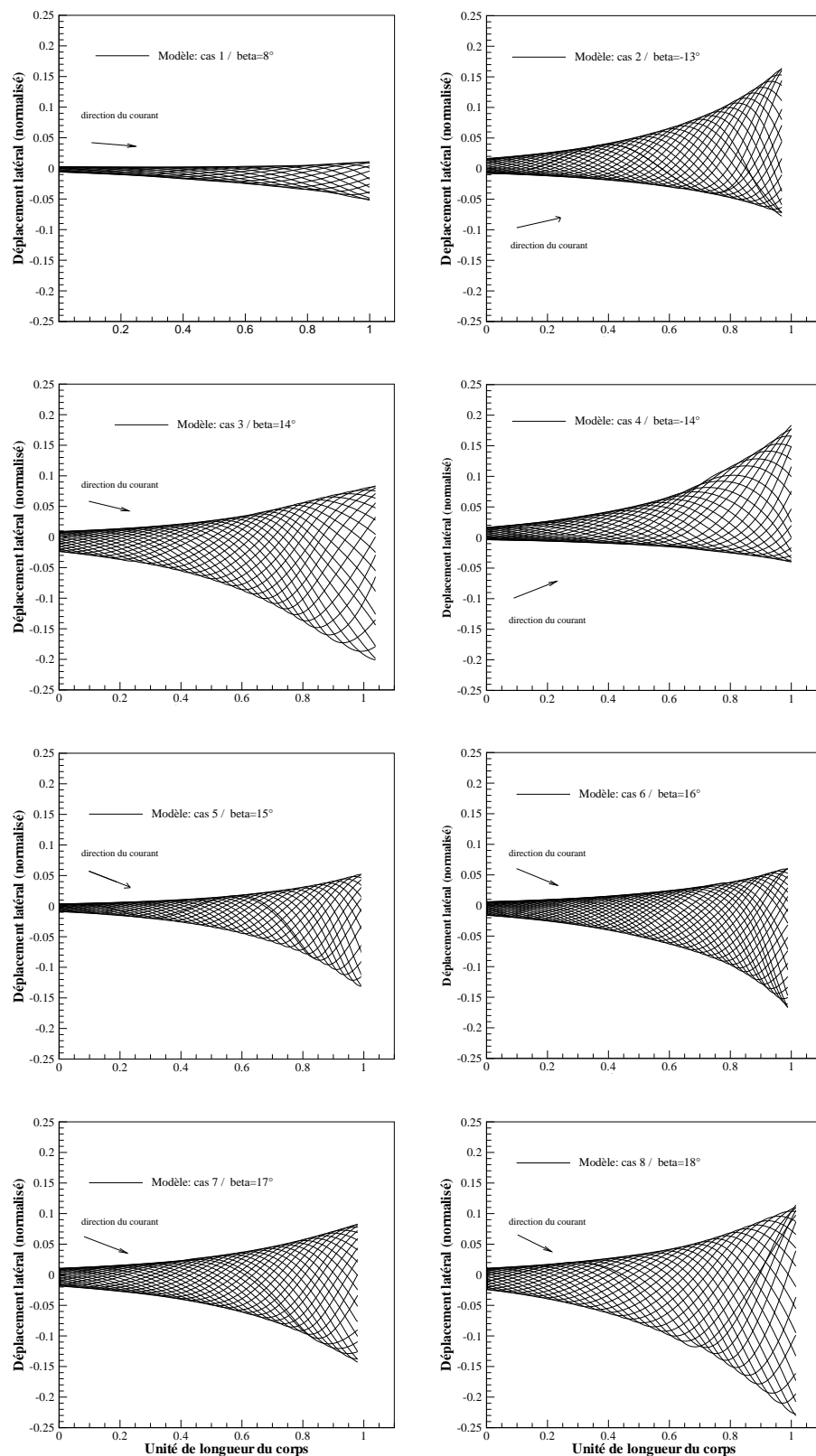


FIGURE 2.17 – Déplacement latéral du corps de l'anguille en fonction du temps. Résultats obtenus à partir du modèle cinématique décrit dans l'équation 2.4. Reproduction des squelettes présentés dans la figure 2.16.

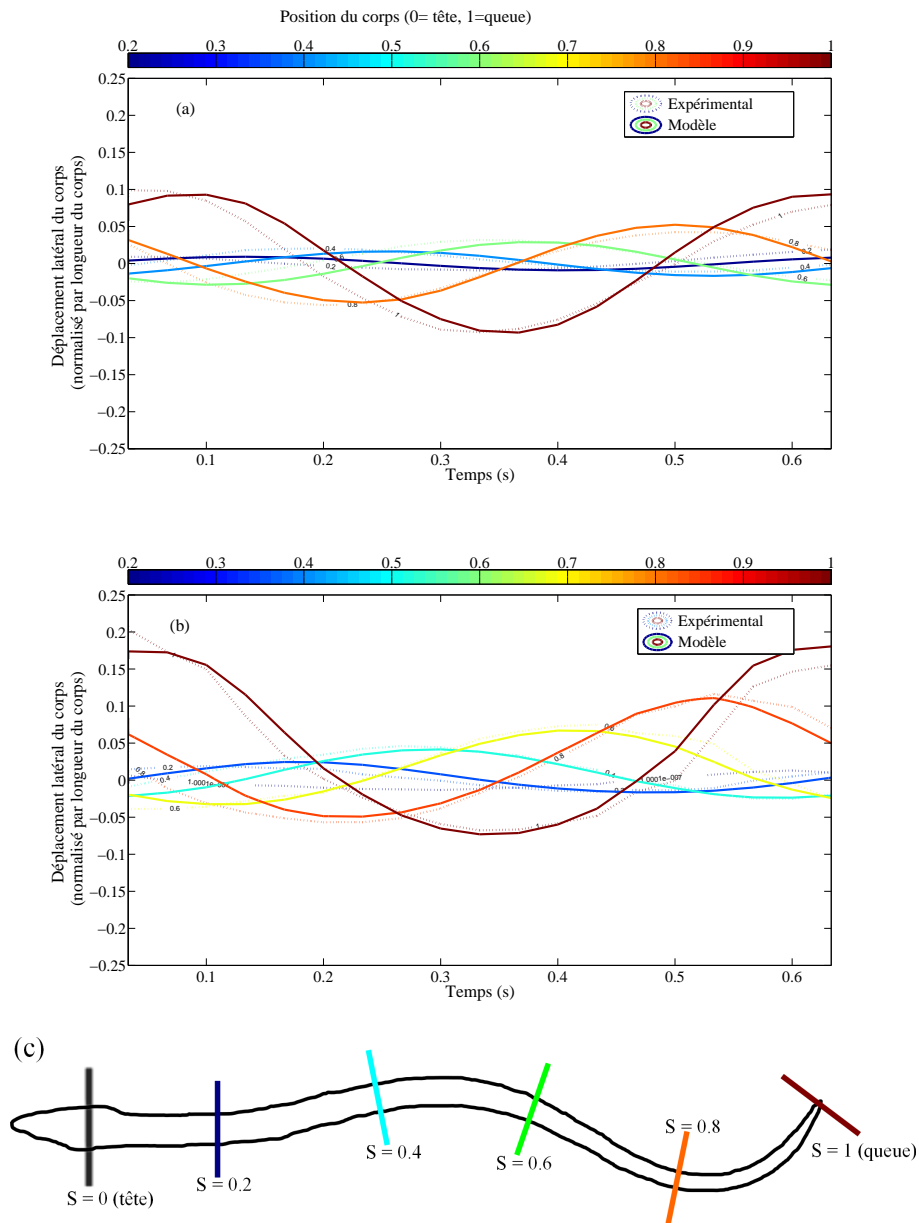


FIGURE 2.18 – Oscillation latérale de différentes positions du corps de l'anguille en fonction du temps, pour les nages par ondulation axiale (a) et ondulation non-axiale (b). (c) Schéma représentant les positions choisies sur le corps de l'anguille. Les contours en pointillés représentent les résultats expérimentaux et les contours solides représentent les résultats obtenus par le modèle.

tation de la dynamique interne du corps (position du corps) a été utilisée dans des nombreuses études, comme exemple nous pouvons mentionner les travaux de Lighthill (1971), Sparenberg (2002) ou encore Eloy et Schouveiler (2011). D'autres travaux ont utilisé la loi de déformation du corps décrite en courbure locale (Candelier *et al.* (2011)). Dans la réalité, l'anguille pendant la nage, contrôle la position relative de ses vertèbres, liée au repère mobile du corps, en actionnant ses muscles répartie de la tête vers la queue. L'avantage d'utiliser la loi en courbure par rapport

à celle en position latérale du corps est que l'extension en trois dimensions est immédiat en ajoutant un paramètre. De ce fait, nous avons choisi de fournir en complément une description de la loi de déformation du corps sous forme d'une courbure locale K_y en fonction de l'abscisse curviligne et le temps. En effectuant une dérivée partielle seconde de l'équation 2.4 ($y(s, t)$) par rapport à l'abscisse curviligne s , on obtient :

$$K_y(s, t) = k A_m \exp^{\alpha(\frac{s}{L}-1)} \left[\left(\frac{\alpha}{L}\right)^2 \ln(\gamma(\beta^*) + A) + \left(\frac{\frac{4\pi\alpha}{\lambda L} B - (\frac{2\pi}{\lambda})^2 C}{1 + \gamma(\beta^*) A}\right) + \left(\frac{(\frac{2\pi}{\lambda})^2 \gamma(\beta^*) (B)^2 A}{(1 + \gamma(\beta^*) A)^2}\right) \right],$$

$$A = \exp^{\sin(\frac{2\pi}{\lambda}(s-Vt))}, B = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(s-Vt)\right), C = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(s-Vt)\right), \gamma(\beta^*) = \sin(|\beta^*|).$$

2.3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude expérimentale de la nage d'une anguille naturelle dans un écoulement à vitesse contrôlé. Nous avons observé un comportement particulier lorsque l'anguille nage en biais par rapport à un écoulement incident. Nous avons constaté qu'elle adapte le mouvement de déformation de son corps afin d'équilibrer la distribution de la force hydrodynamique exercée par le fluide. De ce fait, l'amplitude d'ondulation présente une dissymétrie par rapport à l'axe de nage et elle est plus prononcée du côté non exposé à l'écoulement. Ce comportement a été analysé et nous avons fourni un modèle général permettant de décrire la déformation du corps de l'anguille lors de la nage. Pour ce faire, nous avons intégré un nouveau paramètre à la description classique de la nage axiale, l'angle formé entre la direction de nage et la vitesse de l'écoulement.

Chapitre 3

Étude expérimentale de l'écoulement latéral produit lors de la nage d'un corps élancé

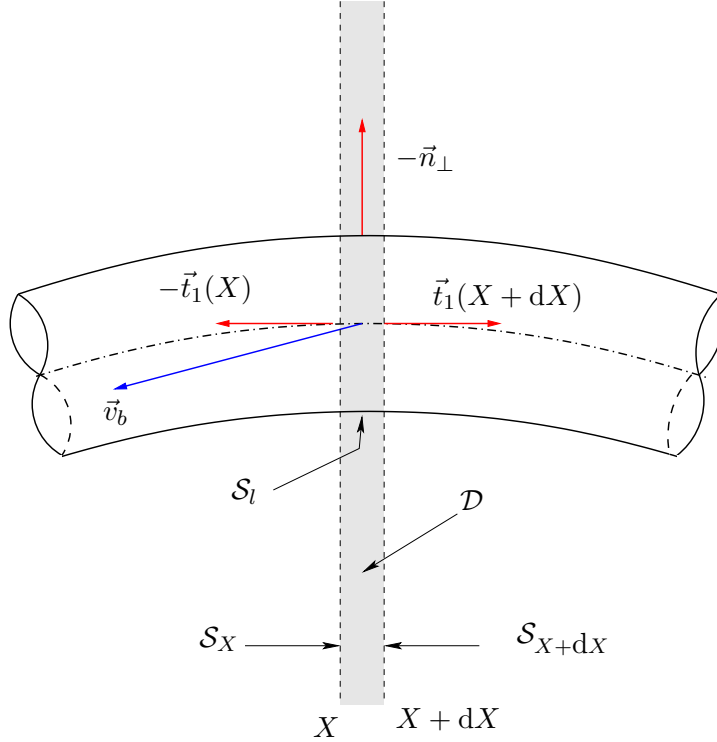
3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent (chapitre 2) les allures de nage anguilliformes ont été caractérisées à l'aide de modèles corrélatifs. En quelque sorte, on peut dire que le chapitre 2 s'est focalisé uniquement sur le corps et sur sa dynamique interne.

Dans ce chapitre nous allons maintenant nous intéresser à la dynamique externe, c'est à dire, à l'écoulement produit par les mouvements du corps lors de la nage. Ces études seront réalisées principalement dans le but de mieux comprendre la théorie dite LAEBT (Large Amplitude Elongated Body Theory), établie par Lighthill (1971), décrivant la force qui s'exerce sur le corps en réponse à ses mouvements.

A notre connaissance, les premiers auteurs à avoir utilisé la technique de la PIV pour étudier l'écoulement produit par un poisson, en l'occurrence une truite, sont Blickhan *et al.* (1992). Ces derniers se sont intéressés principalement au sillage produit lors de la nage et notamment, sont parvenus à mettre en évidence la structure en forme de "maillons de chaîne" produite par les anneaux de vorticité (dans leurs cas, de forme quasi-circulaire). Dans la même lign e, nous pouvons également mentionner les travaux de Müller *et al.* (1997), Wolfgang *et al.* (1999), ou encore ceux de Nauen et Lauder (2002), ou de Sakakibara *et al.* (2004), qui ont également cherché à définir expérimentalement les caractéristiques de l'écoulement produit par la nage de poissons carangiformes.

Concernant la nage anguilliforme, plus au cœur de nos préoccupations, Müller *et al.* (2001), suivi peu après par Tytell et Lauder (2004), ont réalisé des expériences impliquant des anguilles afin notamment de mettre en évidence les différences que l'on peut observer entre un sillage généré par une nage anguilliforme et celui produit lors de la nage caranguiforme.

FIGURE 3.1 – *Domaine considéré pour établir la théorie de Lighthill (1971)*

De manière générale, ces différents travaux se sont focalisés sur le sillage produit lors de la nage, et pour certains d'entre eux, sur la nature de l'écoulement le long du corps, observé dans un plan longitudinal. En revanche, il nous semble que l'écoulement dans les sections latérales (i.e. perpendiculaires aux corps) n'a fait l'objet d'aucune investigation expérimentale bien que cet écoulement joue un rôle central dans la théorie LAEBT de Lighthill.

3.2 Positionnement du problème et retour sur la LAEBT

De manière tout à fait générale, si l'on réalise le bilan de quantité de mouvement d'un fluide parfait, dans un volume \mathcal{D} animé d'un mouvement propre (voir par exemple Coirier 2001, pp 137), celui-ci s'écrit alors

$$\underbrace{\frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{D}} \rho \vec{v}_f dV}_{(i)} + \underbrace{\int_{\partial \mathcal{D}} \rho \vec{v}_f (\vec{v}_r \cdot \vec{n}) dS}_{(ii)} = \underbrace{\int_{\partial \mathcal{D}} -p \vec{n} dS}_{(iii)}, \quad (3.1)$$

où le terme (i) correspond à la variation au cours du temps de la quantité de mouvement du fluide au sein du volume \mathcal{D} , le terme (ii) correspond au flux de quantité de mouvement à travers la surface délimitant ce domaine et enfin le terme (iii), aux efforts de pression s'exerçant sur cette même surface.

Pour établir la théorie de Lighthill, le domaine élémentaire que l'on peut considérer est celui formé par deux plans orthogonaux à la ligne centrale du corps, intersectant cette dernière aux

abscisses curvilignes X et $X + dX$, tel que représenté sur la figure 3.1. Notons alors que pour la section localisée en $X + dX$, la normale sortante est égale à $\vec{t}_1(X + dX)$, tandis que pour la section située en X , celle-ci est donnée par $-\vec{t}_1(X)$. Par ailleurs, étant donné que sur la surface latérale du corps, on peut écrire que

$$\int_{S_l} -p \vec{n}_\perp dS_l = \vec{f}_{c/f}$$

où $\vec{f}_{c/f}$ correspond à la force que le corps exerce sur le fluide, un passage à la limite, lorsque dX tend vers 0 nous amène à

$$\lim_{dX \rightarrow 0} \frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{D}} \rho \vec{v}_f d\mathcal{V} + \frac{\partial}{\partial X} \left\{ \int_{\partial \mathcal{D}} \rho \vec{v}_f (V_f^1 - V_b^1) dS_X \right\} dX = - \frac{\partial}{\partial X} \left\{ \int_{\partial \mathcal{D}} p \vec{t}_1 dS_X \right\} dX - d\vec{f}_{f/c}, \quad (3.2)$$

où V_b^1 et V_f^1 sont les composantes suivant \vec{t}_1 des vitesses du domaine et du fluide à sa frontière et où

$$d\vec{f}_{f/c} = \frac{\partial \vec{f}_{f/c}}{\partial X} dX$$

correspond à la densité linéique de force que le fluide exerce sur le corps.

Pour simplifier les calculs, Lighthill est amené à faire certaines hypothèses, qui, même s'il ne le mentionne pas explicitement, reviennent à considérer que l'écoulement, dans chacune des sections latérales du corps, correspond à celui qui serait généré par le déplacement d'un cylindre elliptique de même section S_X . En effet, en admettant cette hypothèse, c'est à dire, en écrivant simplement que

$$\vec{v}_f = \vec{v}_\perp^0 \quad \text{et} \quad p = p^0,$$

où \vec{v}_\perp^0 et p^0 correspondent à la vitesse de l'écoulement potentiel autour d'un cylindre elliptique et à la pression associée à ce mouvement, il apparaît quasi immédiatement que

$$\lim_{dX \rightarrow 0} \frac{\delta}{\delta t} \int_{\mathcal{D}} \rho \vec{v}_f d\mathcal{V} \longrightarrow \frac{\partial \vec{p}_f}{\partial T} dX,$$

où \vec{p}_f correspond à "l'impulsion du fluide" dans la section latérale, et où l'utilisation de la lettre capitale T indique que la dérivée partielle est réalisée en maintenant fixe les coordonnées X , Y et Z attachées aux corps. De même, il apparaît que

$$\frac{\partial}{\partial X} \left\{ \int_{\partial \mathcal{D}} \rho \vec{v}_f (V_f^1 - V_b^1) dS_X \right\} dX \longrightarrow - \frac{\partial V_b^1 \vec{p}_f}{\partial X} dX,$$

et par ailleurs, après calculs (voir Lighthill 1971), il est possible d'établir que

$$- \frac{\partial}{\partial X} \left\{ \int_{\partial \mathcal{D}} p^0 \vec{t}_1 dS_X \right\} dX \longrightarrow - \frac{\partial T_f \vec{t}_1}{\partial X} dX,$$

où T_f correspond à l'énergie cinétique du fluide dans la section latérale. Finalement nous sommes alors conduits au modèle qui constitue à proprement parler la théorie dite LAEBT de Lighthill, à savoir :

$$\vec{f}_{f/c} = \int_0^l \left(- \frac{\partial \vec{p}_f}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} (V_b^1 \vec{p}_f - T_f \vec{t}_1) \right) dX. \quad (3.3)$$

En réalité, l'hypothèse selon laquelle l'écoulement dans une section latérale correspond à celui qui serait généré par le déplacement d'un cylindre elliptique de section identique est très forte et constitue naturellement une source de contestation légitime. De surcroît, les simulations numériques réalisées par Wolfgang *et al.* (1999), ainsi que celles réalisées par Porez (2007), à l'aide de la méthode BEM (Boundary Element Method) ont clairement montré que l'écoulement latéral produit par les mouvements du corps différerait significativement de l'écoulement potentiel dans la mesure où celui-ci était perturbé par les effets de courbure du corps. Ces différences notables ont d'ailleurs conduit certains auteurs à remettre en cause le bien fondé de la théorie de Lighthill (Wolfgang *et al.* 1999).

C'est donc dans ce contexte que récemment, dans le cadre du projet ANGELS, Candelier *et al.* (2011) ont réalisé une étude théorique dont le but était de calculer directement la résultante de pression s'exerçant sur le corps, tout en prenant en compte, par le biais d'une méthode de perturbation, les effets produit par la courbure du corps, ainsi que ceux produits par la variation de la taille des sections le long de l'abscisse curviligne, sur l'écoulement observé dans une section latérale pendant la nage. L'un des résultats marquant de cette étude est que bien que l'écoulement latéral diffère du simple écoulement potentiel \vec{v}_\perp^0 , la résultante qui s'exerce sur le corps et qui correspond à la théorie LAEBT de Lighthill reste néanmoins identique, du fait d'un jeu de compensation des termes de perturbations. Pour établir ce résultat, les auteurs ont été amené à calculer l'expression théorique du potentiel (perturbé) des vitesses dans une section latérale, et ce chapitre a pour but de confronter ces résultats théoriques aux résultats expérimentaux.

3.2.1 Expression théorique du potentiel de l'écoulement dans la section latérale du corps

Avant la présentation du travail expérimental, nous donnons préalablement les expressions théoriques développées par Candelier *et al.* (2011) du potentiel de vitesses (perturbé) dans une section latérale du corps durant la nage. Les auteurs ont obtenu l'expression du potentiel, par le biais d'une méthode de perturbation, de sorte que celui-ci est donnée sous la forme d'une somme de deux termes liés aux deux effets suivants :

- le potentiel de vitesse produit par la variation de la taille de section le long du corps Φ_\parallel
- le potentiel de vitesse produit durant la translation latérale de l'ensemble du corps Φ_\perp , lui même égale à la somme de l'écoulement potentiel Φ_\perp^0 autour d'un cylindre et la perturbation due aux effets de courbure Φ_\perp^1

L'expression analytique des potentiels se présente comme suit (voir Candelier *et al.* 2011) :

$$\Phi_\parallel = -\frac{V_x}{2} \left(\left(\frac{\partial \alpha}{\partial X} \beta + \frac{\partial \beta}{\partial X} \alpha \right) u - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial X} \beta + \frac{\partial \beta}{\partial X} \alpha \right) \cos(2v) \exp(2u_0 - 2u) \right), \quad (3.4)$$

et

$$\Phi_{\perp} = \underbrace{-\alpha V_z \sin(v) \exp(u_0 - u)}_{\Phi_{\perp}^0} - \underbrace{\frac{a}{4} \exp(-u_0) (K \alpha V_z) \left(u + \frac{1}{2} \exp(2u_0 - 2u) \right) - \frac{a \exp(u_0)}{8} (K \alpha V_z \cos(2v))}_{\Phi_{\perp}^1}, \quad (3.5)$$

où (u, v) représente les coordonnées elliptiques tel que représentées sur la figure 3.2, u_0 la section elliptique du corps, K la courbure, α le demi-grand axe, β le demi-petit axe, $\partial\alpha/\partial X$ et $\partial\beta/\partial X$ les coefficients de variation de la section elliptique, V_X et V_Z sont respectivement les vitesses de déplacements de la section dans le repère cartésien (X, Y, Z) .

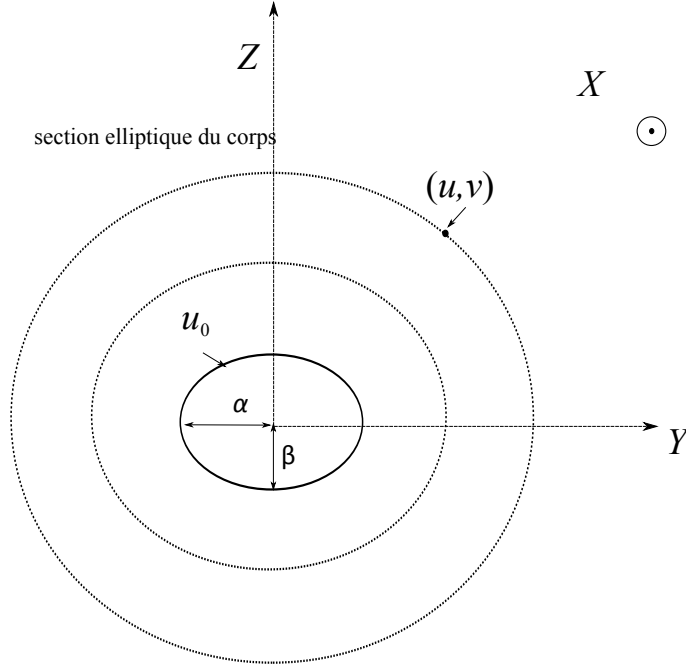


FIGURE 3.2 – Section elliptique du corps.

D'un point de vue pratique nous travaillons dans un domaine base cartésienne. Les mesures expérimentales des champs de vitesses seront donc présentés dans le plan cartésien (Y, Z) . Pour ce faire, nous allons appliquer une transformation du champs de vitesses (théorique) des coordonnées elliptiques aux coordonnées cartésiennes (voir le détail de calcul dans Candelier *et al.* 2012).

Les coordonnées elliptiques (u, v) , où $u \geq 0$ et $0 \leq v \leq 2\pi$, sont liées aux coordonnées cartésiennes par les relations suivantes :

$$Y = a \cosh(u) \cos(v) \quad \text{et} \quad Z = a \sinh(u) \sin(v), \quad a = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (3.6)$$

et la jacobienne du changement de coordonnées est de la forme suivante :

$$J = a^2 \sinh(u)^2 + a^2 \sin(v)^2, \quad (3.7)$$

Le champ de vecteur vitesse dans la section latérale est égale au gradient du potentiel de vitesse. En terme de coordonnées elliptiques, les dérivées partielles dans le plan cartésien s'écrivent :

$$\frac{\partial}{\partial Y} = \frac{a}{J} \left(\sinh(u) \cos(v) \frac{\partial}{\partial u} + \cosh(u) \sin(v) \frac{\partial}{\partial v} \right), \quad (3.8)$$

et

$$\frac{\partial}{\partial Z} = \frac{a}{J} \left(\cosh(u) \sin(v) \frac{\partial}{\partial u} + \sinh(u) \cos(v) \frac{\partial}{\partial v} \right). \quad (3.9)$$

Les champs de vitesses théoriques sont calculés sous le logiciel "Matlab" pour des conditions similaires à celles utilisées expérimentalement, afin de pouvoir les comparer. Pour plus d'information concernant l'algorithme de calcul de vitesses dans la section latérale, le lecteur peut se référer à l'annexe B.

3.3 Visualisation par PIV de l'écoulement dans les sections latérales

Pour réaliser nos expériences, une modification a été apportée au banc d'essai et une nouvelle procédure expérimentale a été mise en place. Nous avons effectué cette étude sur des modèles, pour identifier et isoler les effets produits par la courbure du corps, ainsi que ceux produits par la variation de la taille de la section le long de l'abscisse curviligne, sur l'écoulement dans une section transversale (i.e. perpendiculaire au corps).

Durant la nage d'un poisson élané, la propulsion est produite par la propagation d'une onde de déformation le long du corps de la tête vers la queue. Au voisinage de la tête, la courbure est généralement négligeable et la vitesse latérale de l'écoulement est très faible par rapport à sa vitesse axiale. Par conséquent, l'écoulement latéral observé est généralement produit par l'effet de la variation de la taille de la section. En revanche, au voisinage de la queue, la courbure locale du corps devient significative. L'écoulement latéral observé est donc produit en grande partie par le déplacement latéral du corps, perturbé par la courbure locale.

Pour isoler l'effet de la variation de la taille de la section et l'effet de la courbure sur l'écoulement latéral, nous avons donc distingué deux mouvements, représentés sur la figure 3.3, à savoir :

- (a) Le déplacement de l'ensemble du corps suivant l'axe des x (translation axiale) : dans ce cas, la courbure est nulle, mais la taille des sections droites (elliptique) varient le long du corps.
- (b) Le déplacement de l'ensemble du corps suivant l'axe des z (translation latérale) : dans ce cas, le corps présente une section elliptique constante et une courbure locale non nulle.

3.3.1 Instrumentations et méthodes

Tous d'abord, nous avons conçu des modèles cylindriques de formes elliptiques qui varient en fonction de l'application souhaitée. Ensuite, selon l'application et le modèle utilisé, une configu-

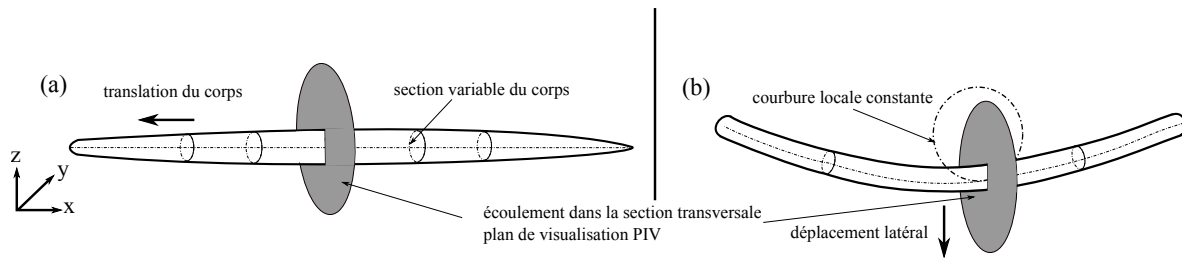


FIGURE 3.3 – Schéma représentatif des deux mouvements de translation d'une section d'un corps lors de la nage.

ration particulière de mesure a été mise en œuvre. Les détails et les démarches de la procédure expérimentale sont présentés dans ce qui suit.

Modèles cylindriques à sections elliptiques

Cinq modèles cylindriques ont été conçus sous le logiciel de conception CAO "AUTOCAD", en tenant compte des deux paramètres suivants : la courbure et la section du cylindre. Deux formes de cylindres elliptiques ont donc été réalisées : un cylindre à sections variables dont la courbure est nulle et un cylindre à section constante dont la courbure locale est non nulle. La figure 3.4 présente le plan de conception CAO des deux types de cylindres.

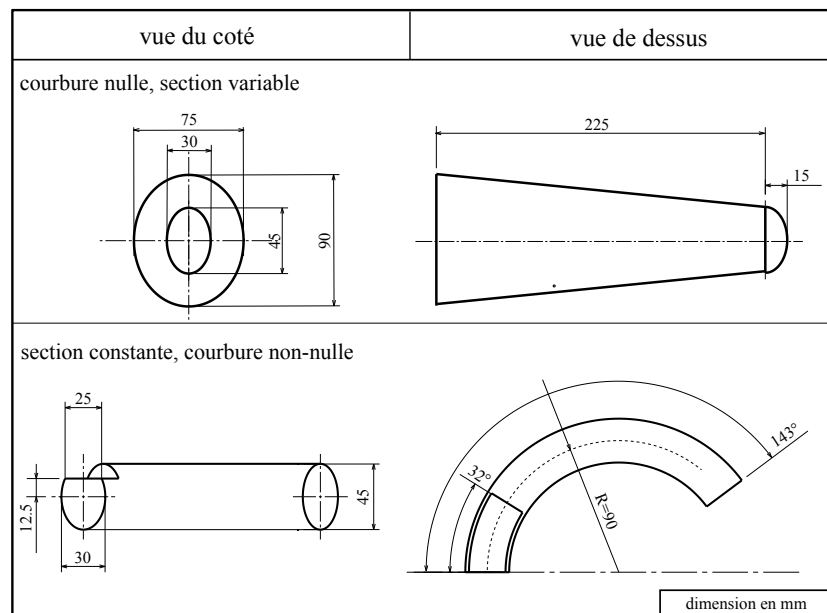


FIGURE 3.4 – Schéma des deux types de cylindres utilisés.

Le tableau 3.1 référence les caractéristiques géométriques des cylindres. Notons que ces caractéristiques ont été choisis en respectant certaines contraintes expérimentales, comme par exemple, les dimensions des zones d'études.

Rappelons que, α représente le demi grand-axe, β le demi petit-axe, R le rayon de courbure,

TABLE 3.1 – Caractéristiques géométriques des cylindres elliptiques

Model	α	β	R	K	$\partial\alpha/\partial x = \partial\beta/\partial x$
C_1	1	0.67	∞	0	0.1
C_2	1	0.67	∞	0	0
C_3	1	0.67	6.66	0.15	0
C_4	1	0.67	5.34	0.1875	0
C_5	1	0.67	4	0.25	0

Normalisé par rapport à α

$K = 1/R$ la courbure et $\partial\alpha/\partial x$ et $\partial\beta/\partial x$ sont respectivement les coefficients de variation du demi grand-axe et demi petit-axe de la section elliptique. Notons que toutes les valeurs sont normalisées par rapport au demi grand-axe α .

Le cylindre C_1 de courbure nulle, présente une section variable dont le coefficient de variation est égal à $\partial\alpha/\partial x = \partial\beta/\partial x = 0.1$. Les cylindres C_2, C_3, C_4 et C_5 présentent une section elliptique constante mais une courbure respectivement égale à 0, 0.15, 0.185 et 0.25.

La fabrication des cylindres a été confiée à la société "Polyrepro". La technologie utilisée est appelée "Stéréolithographie" (ou prototypage rapide). Cette technique permet de fabriquer des objets solides à partir d'un modèle numérique CAO. Dans notre cas, le prototypage rapide est utilisé pour réaliser le moule de l'objet. Ensuite, une matière en plastique transparente (polycarbonate) est coulée dans le moule afin d'obtenir le modèle final.

La figure 3.5 présente les photographies des cylindres elliptiques. À gauche, nous trouvons le cylindre C_1 à section variable. La photo du milieu présente respectivement, de gauche à droite, les cylindres C_3, C_4 et C_5 . Comme, la construction du cylindre C_2 ne demande pas une technologie particulière (géométrie classique), il a été réalisé dans l'atelier de notre laboratoire en matière plastique PVC. Ceci explique la couleur noir du cylindre (C_2) présentée sur la photo de droite de la figure 3.5.

Dispositif expérimental

La technique de mesure utilisée dans cette étude est la vélocimétrie par image de particules PIV. Le principe et les matériels de cette technique sont présentés dans la section 1.3.3 du chapitre 1.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la visualisation de l'écoulement dans la section transversale des modèles elliptiques. Pour ce faire, un dispositif expérimental a été mise en place, il est présenté sur le schéma de la figure 3.6.

Le laser illumine le plan transversal (perpendiculaire à la direction de l'écoulement) de la zone d'étude à travers la fenêtre de visualisation de l'aquarium. Deux axes motorisés contrôlent le déplacement de ce dernier suivant deux directions : longitudinale (axe 1) et verticale (axe 2).

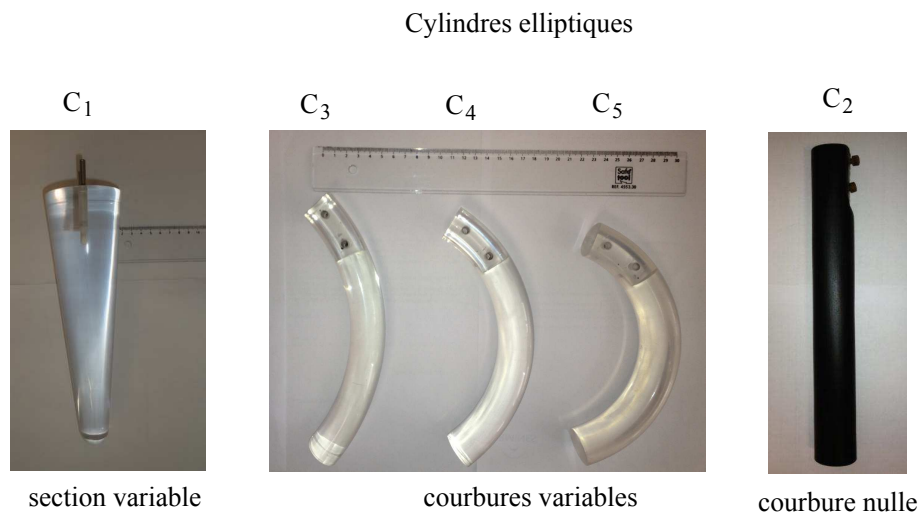


FIGURE 3.5 – Photographies des modèles cylindriques à sections elliptiques.

Un troisième axe motorisé (axe 3) assure un déplacement synchronisé de la caméra CCD avec le déplacement du laser en profondeur (axe 1).

La caméra est placée perpendiculairement par rapport au champ laser, immergée dans l'eau à une hauteur réglable. Du fait de l'immersion de la caméra, nous avons conçu un caisson parfaitement étanche à partir d'un tube de PVC de diamètre 15 cm. L'extrémité arrière (face non exposée à l'écoulement) du caisson est obstruée en soudant une plaque transparente de section circulaire (de diamètre égale au diamètre du caisson). Nous plaçons à l'autre extrémité, à partir desquels nous visualisons l'écoulement, une autre plaque transparente en forme circulaire amovible dont l'étanchéité est garantie par un joint torique. Un tube soudé au dessus du caisson permet d'acheminer les câbles de connexions et de connecter la caméra au système d'acquisition. Ceci a permis aussi de connecter l'objectif à un système mécanique permettant de régler à distance la mise au point de la caméra. Le caisson présente une bonne rigidité face à l'écoulement incident. Pour la caméra, nous avons utilisé un objectif de focale égale à 60 mm, ce qui a permis de placer le caisson à une distance suffisante pour ne pas affecter l'écoulement dans le champ de mesure.

Après avoir installé le matériel nécessaire pour réaliser les mesures PIV, la deuxième étape consiste en la mise en place des deux dispositifs utilisés pour réaliser les expériences sur le cylindre C_1 d'une part et pour les cylindres C_2 , C_3 , C_4 et C_5 d'autre part.

Pour C_1 (première configuration), nous n'avons pas déplacé le cylindre. Nous l'avons maintenue fixe face à un écoulement de vitesse U_∞ contrôlée. Ceci, correspond à un mouvement de translation longitudinal du cylindre à une vitesse V_z qui est égale à $-U_\infty$. La figure 3.7 présente le schéma de la première configuration, ainsi, que les photographies (vue de dessus et de droite) du champ de mesure PIV.

Le cylindre C_1 est fixé à l'aide d'une tige rigide, placé au milieu de l'aquarium. L'axe de révolution du cylindre est parallèle à la direction de l'écoulement et la face convexe est exposée

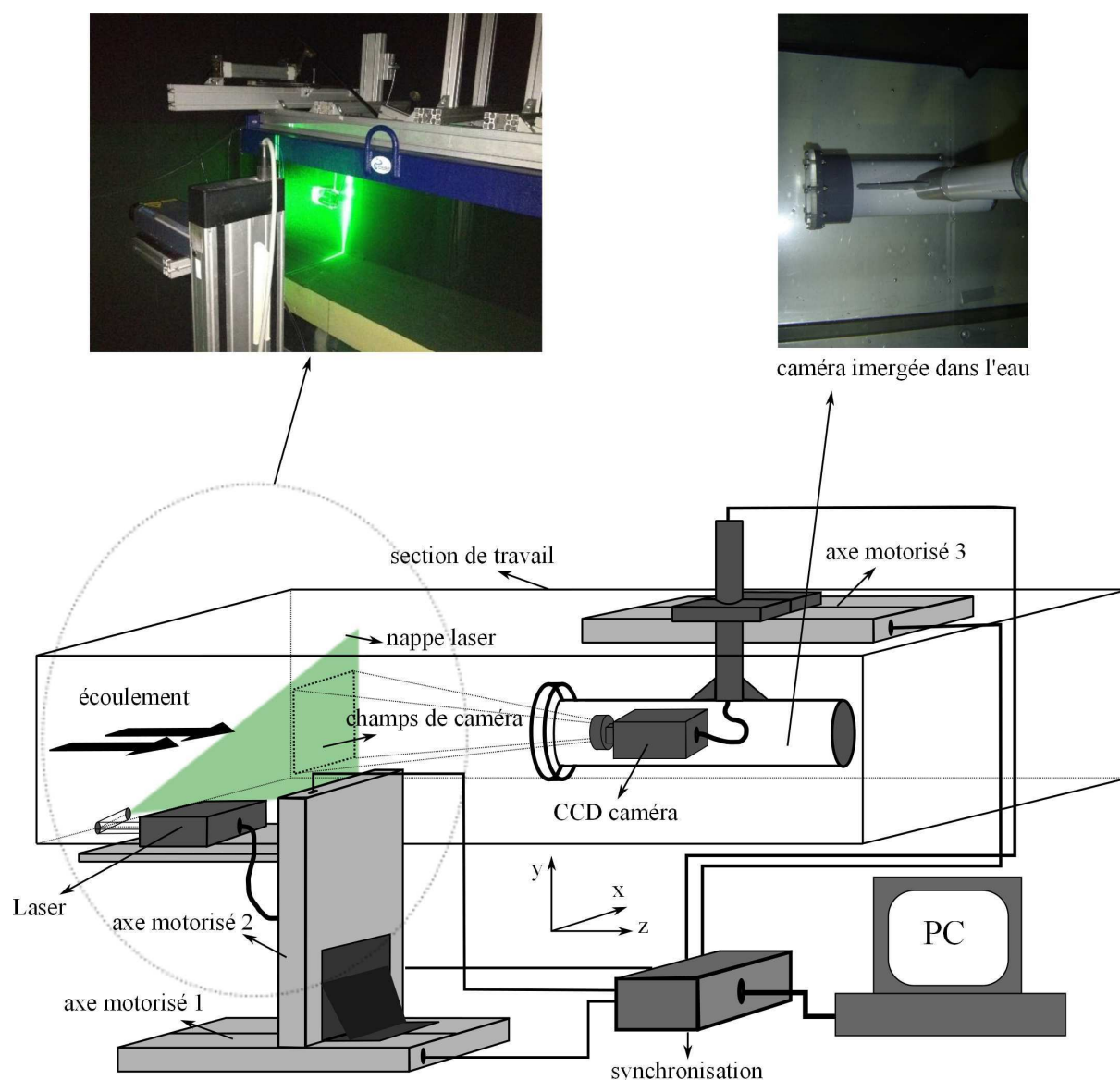


FIGURE 3.6 – Schéma du dispositif expérimental permettant de visualiser l'écoulement dans les sections transversales des modèles cylindriques.

à l'écoulement amont. La nappe laser illumine les particules dans la section médiane perpendiculaire au cylindre et sont filmées par la caméra immergée placée en aval.

Dans la deuxième configuration, les mesures sont réalisées dans un fluide au repos (i.e. sans vitesse d'écoulement). Le déplacement latéral des cylindres est effectué à l'aide d'un système de déplacement pneumatique mis en place spécifiquement pour cette étude. La figure 3.8 présente la deuxième configuration du dispositif expérimental (à droite) et les photographies (vue de dessus et de droite) du champ de mesure PIV.

Le système de déplacement est composé d'un vérin pneumatique, d'un régulateur de pression et d'une glissière à faible frottement. Le régulateur de pression permet de modifier la vitesse de déplacement par variation de la pression d'entrée. Le mouvement du piston entraîne la glissière,

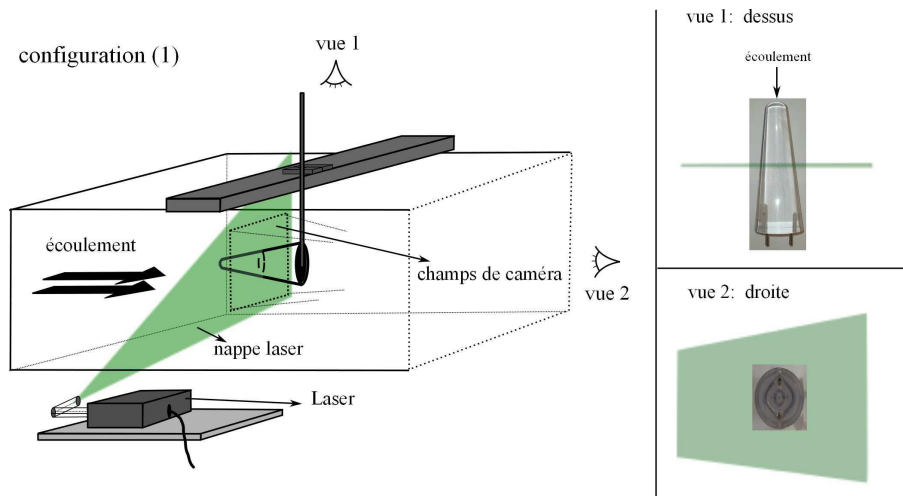


FIGURE 3.7 – Schéma représentatif du dispositif expérimental dans la première configuration. À droite, schéma en perspective. À gauche, deux photographies présentant le champ de mesures PIV dans la section transversale du cylindre elliptique à section variable.

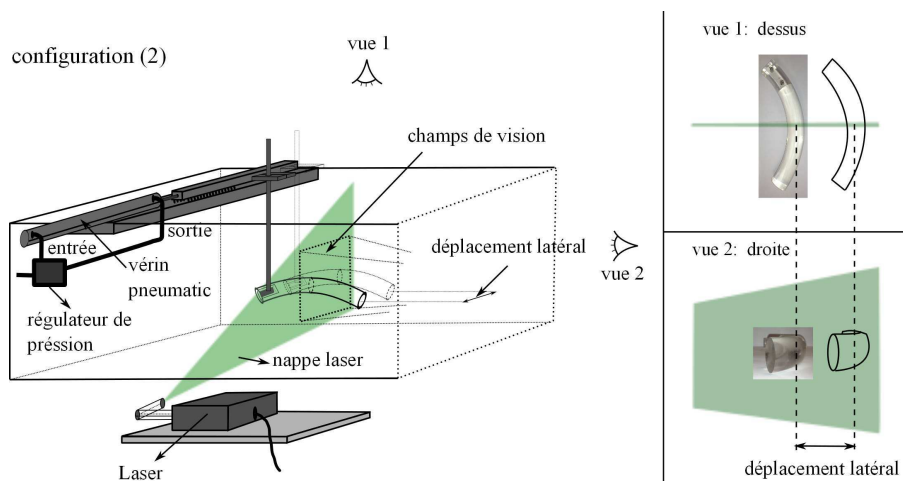


FIGURE 3.8 – Schéma représentatif du dispositif expérimental dans la seconde configuration. À droite, schéma en perspective. À gauche, deux photographies présentant le champ de mesures PIV dans la section transversale du cylindre elliptique à courbure non nulle.

qui transmet ce mouvement au cylindre elliptique courbé (C_2 par exemple) par le biais d'une tige support. De même que dans la première configuration, le plan laser illumine les particules dans la section médiane perpendiculaire au cylindre.

Enfin, précisons que la calibration et la mise au point du dispositif de mesure a été délicate. Plusieurs facteurs entre en jeu, notamment, le fait que la caméra soit placée dans un caisson et immergée dans l'eau.

3.3.2 Résultats et discussions

Effet de la variation de la taille de la section

Dans cette partie, l'écoulement latéral produit lors de la variation de la taille de la section du corps est présenté. Le cylindre C_1 est fixé face à un écoulement incident de vitesse $U_\infty = 0.28$ m/s, ce qui correspond à une vitesse moyenne de nage observé chez les poisson. La figure 3.9 présente une photographie PIV obtenue par la caméra CCD (a) et le champ de vitesse PIV (b) associé.

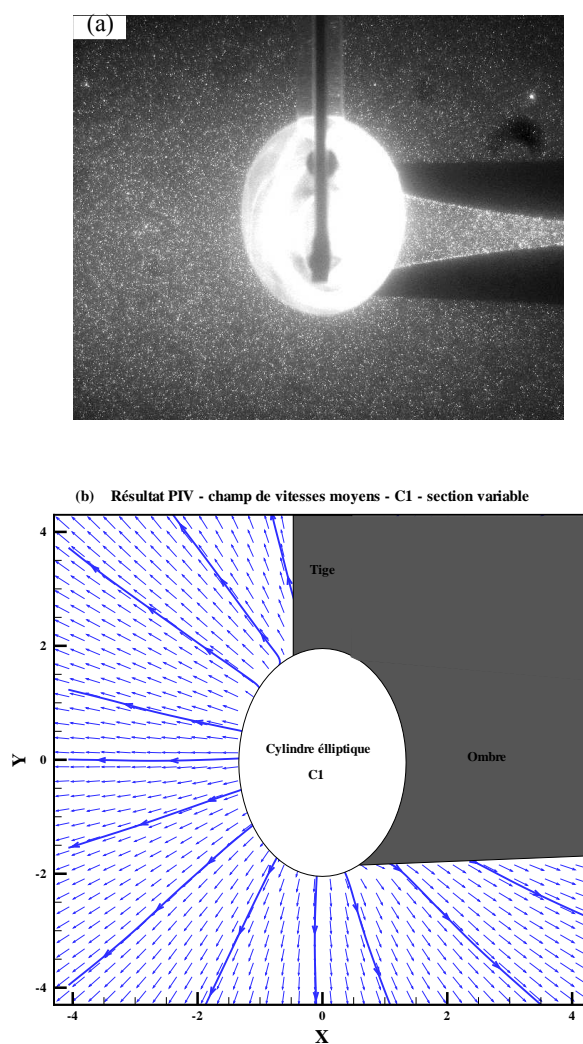


FIGURE 3.9 – Résultat PIV du champ de vecteurs vitesses dans la section latérale du cylindre elliptique à section variable C_1 : (a) photo instantanée et (b) champ de vitesses moyenné sur 1500 mesures instantanées.

Le laser illumine les particules de polyamide dans la section latérale médiane du cylindre, de la gauche vers la droite. C'est pourquoi nous observons une zone d'ombre, due principalement au passage du rayon laser au travers de la section elliptique d'indice de réfraction différent de

celui du fluide. Cette zone d'ombre à droite est inexploitable, elle n'est donc pas étudiée. Il en est de même, pour la zone cachée par la tige de fixation.

Pour obtenir un champ de vitesse par PIV, nous effectuons une étude de corrélation entre deux images successives. L'intervalle de temps est réglé en fonction de la valeur moyenne de la vitesse mesurée. Dans notre cas, nous mesurons la vitesse du déplacement des particules dans le plan perpendiculaire à l'écoulement, c'est à dire que, nous nous intéressons que à la composante de la vitesse dans le plan latéral. De ce fait, nous avons élargi l'épaisseur du faisceau laser et la calibration des paramètres de mesures PIV a été choisie en tenant compte de la vitesse de l'écoulement, l'intervalle de temps entre deux images, le nombre de particules (voir section 1.3.3 du chapitre 1).

L'écoulement dans le banc d'essai est considéré uniforme et stationnaire. L'écoulement dans la section latérale du cylindre est donc aussi considéré stationnaire. De ce fait, le champs de vitesse de la figure 3.9 (b) présente les vecteurs (en bleu) de vitesses moyennés sur 1500 mesures instantanées. Nous observons que le fluide incident est bien poussé par le cylindre latéralement, du fait de l'augmentation de la taille de la section elliptique suivant la direction longitudinale de l'écoulement. Les vecteurs vitesse présentés sont normalisés par rapport à la vitesse de l'écoulement amont U_∞ et leur valeur moyenne est équivalente à approximativement 2 % de U_∞ .

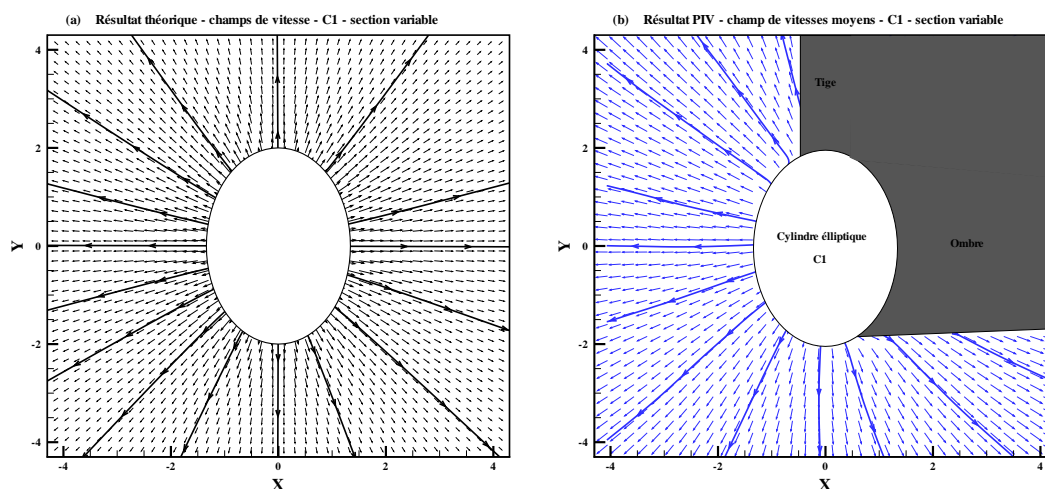


FIGURE 3.10 – Champs de vitesses dans la section latérale du cylindre à section variable : (a) résultat théorique et (b) résultat expérimental (figure 3.9 b).

Pour les mêmes caractéristiques géométriques du cylindre C_1 , et les mêmes conditions d'écoulements, nous avons calculé le champs de vitesse théorique dans la section latérale, présenté sur la figure 3.10 (a). La valeur moyenne de la vitesse calculée est égale à 2.5 % de la vitesse axiale de l'écoulement incident, ce qui est très proche du résultat expérimental. De plus, nous observons une très bonne correspondance en effectuant une comparaison qualitative entre l'écoulement théorique et celui obtenu expérimentalement (voir figure 3.10 b). Ce qui valide partiellement les calculs théoriques de (Candelier *et al.*, 2011) sur l'effet de la variation de la section sur

l'écoulement latérale du corps d'un poisson élancé durant la nage.

Effet de la courbure

Dans cette partie, les écoulements dans les sections latérales des cylindres C_2 à C_5 sont présentés. La figure 3.11 nous montre deux exemples d'images PIV prises à deux instants différents par la caméra CCD.

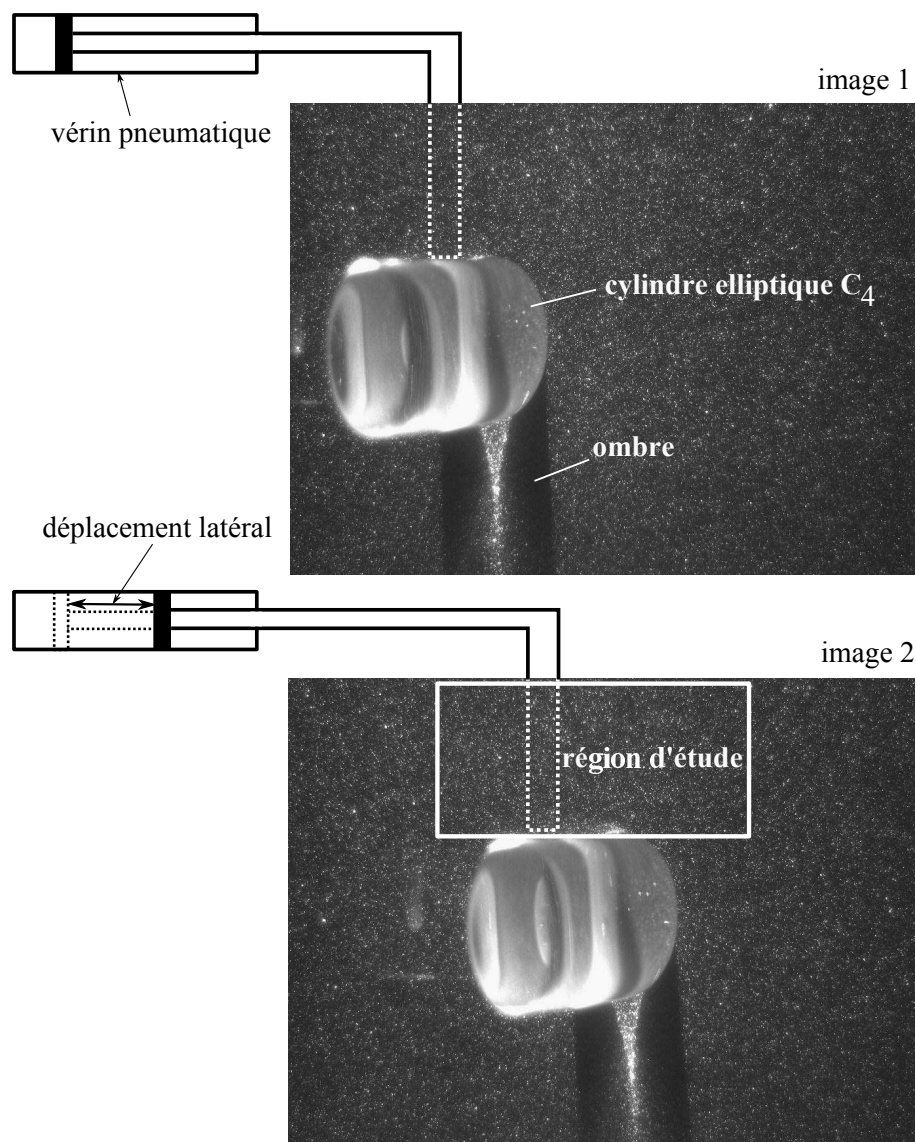


FIGURE 3.11 – Deux photos PIV capturées par la caméra CCD dans la section latérale d'un cylindre courbé (ici cylindre C_4) à deux instants différents.

La première image correspond à la position initial du piston et la deuxième correspond à une position moyenne de sa course totale. Le cylindre se déplace donc de la gauche vers la droite. Notons que, la vitesse du piston sur sa course totale varie, notamment au voisinage des deux extrémités du vérin. L'écoulement que nous allons présenter, est instantané, obtenu par

corrélation de deux images consécutives, prises à l'instant où le piston a effectué la moitié de sa course totale (à cet instant l'accélération est presque nulle).

L'image PIV présente deux zones non exploitables (absence de particules éclairées) : la zone d'ombre et celle du cylindre même. Étant donné que la structure de l'écoulement est symétrique par rapport à l'axe longitudinal du cylindre, la région d'étude sera limitée à l'écoulement au dessus de la partie supérieure du cylindre (voir figure 3.11, image 2).

Les expériences ont été réalisées pour différentes vitesses de déplacement latérale V_x du cylindre. Notons que la calibration des paramètres de mesure PIV dépend de la valeur de V_x qui, dans ce cas d'étude est estimée par la vitesse moyenne de déplacement du piston (sur sa course totale). Parmi les essais réalisés, nous présentons donc l'écoulement pour un déplacement latéral d'une vitesse moyenne (du déplacement totale du cylindre) égale à $V_x = 0.48$ m/s. Étant donné que la vitesse du piston n'est pas homogène sur sa course totale, nous avons estimé pour chaque essai la vitesse instantanée correspondant à l'instant de mesure. Cela afin de normaliser les vecteurs de vitesses mesurés par rapport à la vitesse instantanée du déplacement latéral du cylindre. La figure 3.12 présente les écoulements latéraux produits par le déplacement latéral des cylindres elliptiques de sections constantes et de courbure différentes.

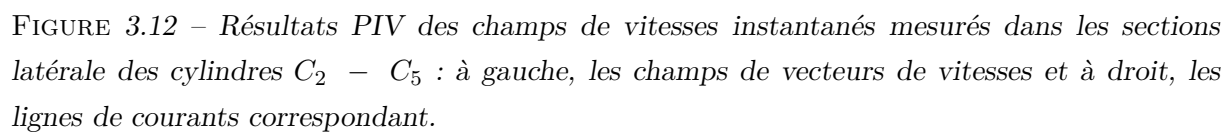
Les écoulements sont présentés respectivement du haut vers le bas pour les cylindres C_2 , C_3 , C_4 et C_5 , sous les deux formes suivantes : champ de vecteurs de vitesse instantanée normalisée (figure 3.12 à gauche) et lignes de courant associées (figure 3.12 à droite).

En première observation, nous remarquons une différence significative entre la structure de l'écoulement potentiel produit par le cylindre C_2 (courbure nulle) et ceux produits par les cylindres C_3 , C_4 et C_5 de courbures non nulles. Les lignes de courant ne présentent plus une structure symétrique par rapport à l'axe vertical comme c'est le cas pour le cylindre C_2 , et la déviation de cet axe est d'autant plus prononcée que la courbure du cylindre est importante.

Pour les mêmes conditions expérimentales utilisées pour les cylindres C_2 à C_5 , nous avons aussi calculé les champs de vitesse théoriques dans la section latérale, présenté sur la figure 3.13 (colonne gauche). Pour une comparaison qualitative, nous remarquons une très bonne correspondance entre les écoulements théoriques et ceux obtenus par PIV (figure 3.13 à droite), pour une comparaison quantitative, nous remarquons aussi une bonne correspondance entre les valeurs de vitesses (contour de vitesses normalisées) obtenues expérimentalement et ceux calculées théoriquement. Ces résultats valident aussi les résultats théoriques de Candelier *et al.* (2011) sur l'effet de la courbure du corps sur l'écoulement latéral produit lors de la nage.

3.3.3 Conclusion

D'après cette étude expérimentale, nous déduisons que la variation de la taille de la section ainsi que la courbure du corps ont des effets significatifs sur la structure de l'écoulement dans la section latérale lors de la nage. La variation de la section d'un coefficient de 0.1 produit un déplacement radial de l'écoulement incident dont la valeur moyenne de la vitesse latérale est de 2% de la vitesse axiale de l'écoulement. Quant à la courbure, sa perturbation sur l'écoulement produit



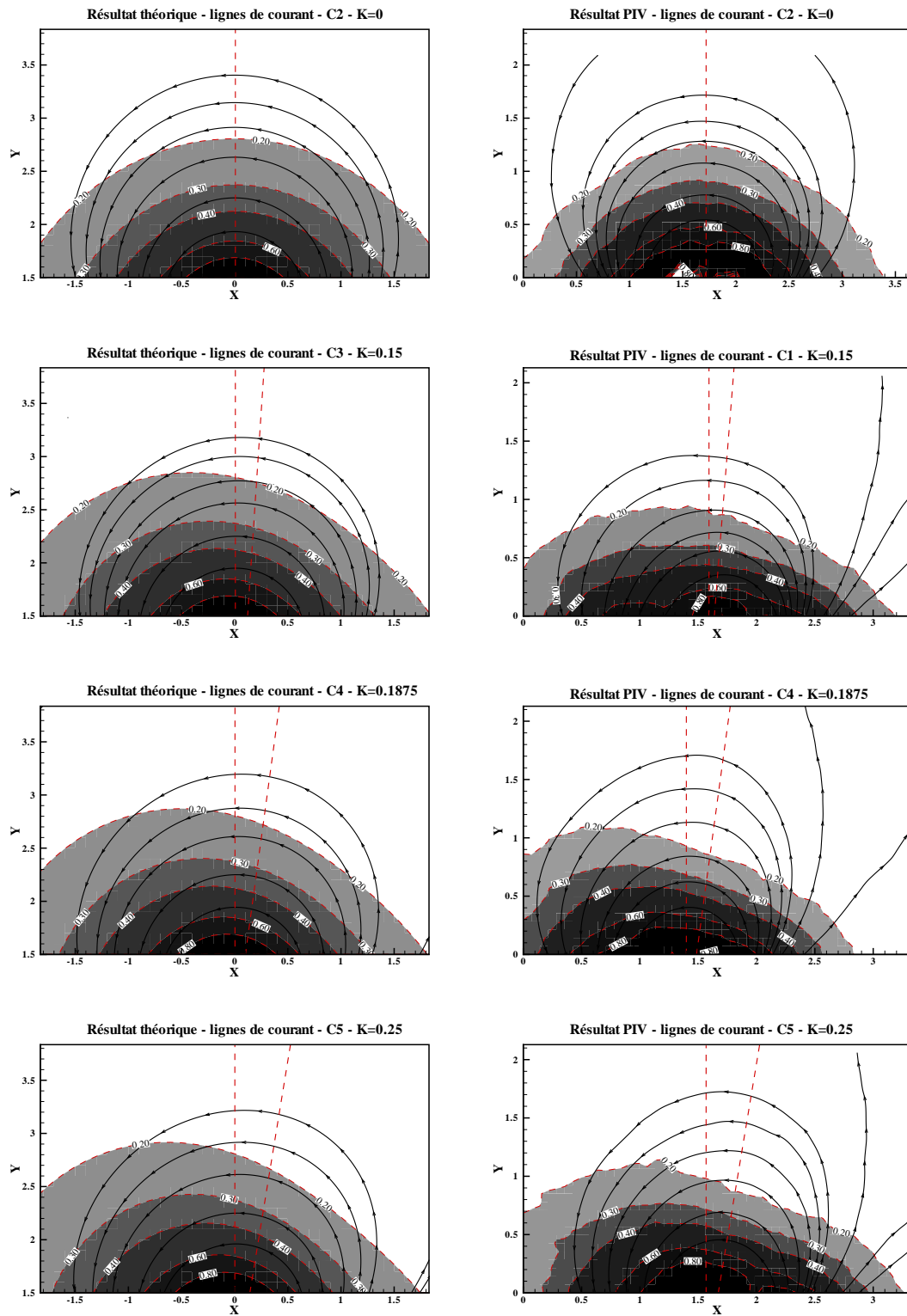


FIGURE 3.13 – Lignes de courants dans les sections latérale des cylindres $C_2 - C_5$: à gauche, les résultats théoriques et à droite, les résultats expérimentaux présentés dans la figure 3.12.

par le déplacement latéral du corps, se traduit par une dissymétrie des lignes de courant, qui est plus prononcée lorsque la courbure du corps augmente, en comparaison à l'écoulement potentiel produit par un cylindre elliptique de longueur infini et de courbure nulle. Cette campagne de mesure expérimentale confirme bien que le potentiel Φ de l'écoulement latéral, est plus complexe que le simple potentiel Φ_{\perp}^0 d'un cylindre elliptique et inclus d'autres effets correspondant à la courbure Φ_{\perp}^1 et la variation de la taille de la section du corps Φ_{\parallel} .

Chapitre 4

Interactions hydrodynamiques

4.1 Introduction

Précédemment nous avons étudié la dynamique interne du corps (chapitre 2), notamment les allures de nages, puis la dynamique du fluide environnant (chapitre 3), où nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'écoulement latéral produit par la déformation du corps lors de la nage anguilliforme. Ces études se sont focalisées sur la nage dans un écoulement uniforme. Dans ce chapitre, nous allons nous à présent mener une étude concernant les interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans un écoulement non-uniforme.

Dans leurs milieux naturels, les poissons évoluent souvent dans de l'eau animée d'un mouvement propre, en rivière par exemple ou encore des courants de marée. Dans ce cas de figure, il a été observé que les poissons s'adaptaient à leurs environnements, d'abord en cherchant refuge, pour s'abriter des courants rapides, dans les zones à basses vitesses (Fausch et White 1981, Fausch 1996 et Webb 1998), mais également en modifiant leurs allures de nage pour tirer bénéfice de l'énergie cinétique présente dans l'écoulement.

Depuis lors, plusieurs études en laboratoire ont été réalisées sur la nage de poisson dans un écoulements tourbillonnaires. Les expériences de Allen et Smits (2001) ont montré que lorsqu'une membrane piézoélectrique se synchronisait avec la fréquence de lâcher de vortex dans le sillage d'une plaque plane verticale (voir figure 4.1 a), celle-ci pouvait en extraire de l'énergie. D'autres travaux théoriques ont montré également qu'une plaque mince placée dans le sillage d'un obstacle pouvait extraire de l'énergie à l'écoulement (Streitlien et al. 1996). Plus récemment, les travaux réalisés par Liao *et al.* (2003b) et Beal *et al.* (2006) ont apporté des informations cruciales sur la nage des poissons, notamment la truite, placés dans une allée de vortex dite Bénard-von Kàrmàn BvK (voir figure 4.2 a) générée dans le sillage d'un demi cylindre (en forme de D).

Dans leurs expériences, Liao *et al.* (2003b) ont observé que la truite se maintenait dans l'allée BvK (voir figure 4.1 b) en adaptant, en fréquence et en phase, les déformations de son corps en fonction de la fréquence des lâcher des vortex. De plus, par électromyographie¹ ils ont tracé l'activité musculaire de son corps, ce qui leur ont permis de conclure que la truite exploitait les

1. Méthode de mesure qui consiste à enregistrer l'activité électrique spontanée d'un muscle

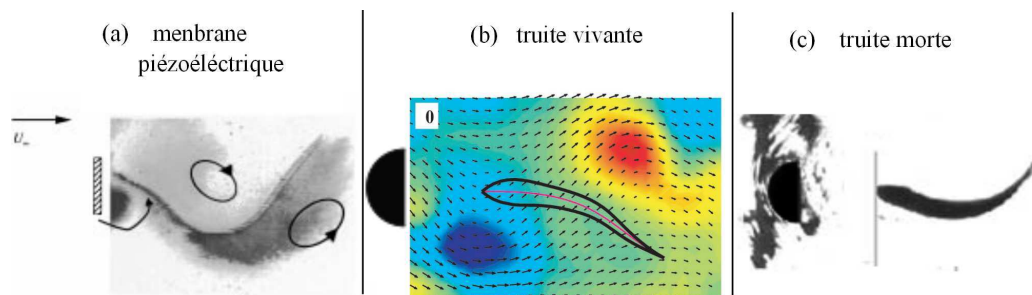


FIGURE 4.1 – La nage dans une allée de vortex alternés : (a) une membrane piézoélectrique en synchronisation avec la fréquence des vortex (Allen et Smits 2001), (b) une truite vivante nageant dans une allée BvK (Liao et al. 2003a) (c) et une truite anesthésiée dans l’allée BvK (Beal et al. 2006).

vortex et réduisait son activité musculaire par rapport à une nage dans un écoulement uniforme (Liao et al. 2003a).

Beal et al. (2006) ont également montré qu’une truite morte (anesthésiée, dont le corps fonc-

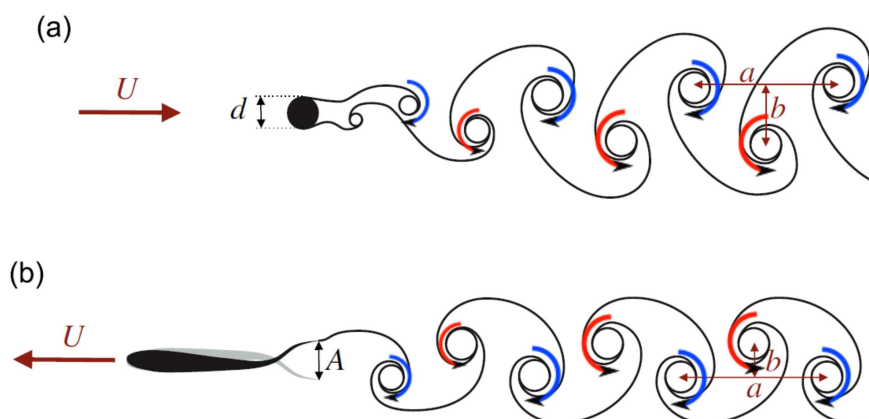


FIGURE 4.2 – Allée de vortex de Bénard–von Kàrmàn (BvK) dans le sillage d’un cylindre (a) et allée de vortex de Bénard-von Kàrmàn inversée (BvK inversée) dans le sillage d’un poisson (b). Cette illustration a été présentée par Eloy (2012).

tionne en mode passif) pouvait extraire de l’énergie dans une allée BvK (voir figure 4.1 c). Ils ont en effet observé que sous certaines conditions, les ondulations de son corps se synchronisaient en fréquence et en phase avec l’écoulement incident. Cette expérience a permis de montrer que le poisson est non seulement capable d’exploiter les vortex pour réduire la force de trainée (exercée par le fluide), mais également d’extraire une énergie propulsive et de remonter l’écoulement d’une manière passive. Des résultats similaires ont été obtenus numériquement par Eldredge et Pisani (2008) sur un système passif de plusieurs modules poly-articulés.

Les interactions hydrodynamiques jouent aussi un rôle important lors de la nage en groupe

organisé. De manière générale, dans ce cas, les poissons qui se trouvent en aval d'autres nageurs, bénéficient de l'écoulement tourbillonnaire généré par les poissons de tête, ce qui d'ailleurs a pu être mesuré par la diminution de la fréquence de battement de leurs queues (Svendsen *et al.* 2003) et la diminution du taux de consommation d'oxygène (Herskin et Steffensen 1998). Notons que l'une des formations de nage en groupe observée chez les poissons est la formation dite en "losange" (Wheis 1973), illustrée sur la figure 4.3. Dans cette configuration, les deux poissons nageant côte à côte génèrent chacun dans leurs sillages une allée de type BvK inversée (voir figure 4.2 b), et le poisson situé en aval, dont les mouvements sont synchrones avec les autres, se positionne au milieu et à une distance bien définie, afin de profiter de l'écoulement. Ce mécanisme peut théoriquement augmenter la force de propulsion d'environ 10 à 30 %, sans dépense d'énergie supplémentaire (Wheis 1973). Pour plus d'information sur la nage dans un écoulement perturbé, le lecteur pourra se rapporter à la review publiée par Liao (2007).

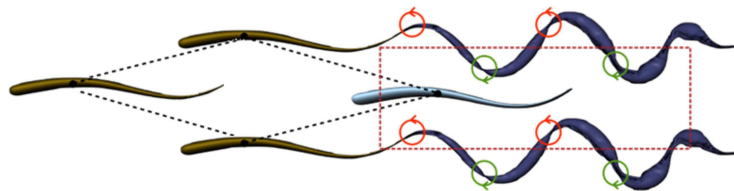


FIGURE 4.3 – Illustration de la nage en groupe comme décrite par Wheis (1973). Le losange pointillé montre la formation en losange et le rectangle en pointillé montre l'allée BvK obtenue entre deux allées de BvK inversées.

Très récemment, Candelier *et al.* (2012) ont réalisé une étude théorique dont le but était de calculer la résultante de pression exercée par un fluide en mouvement sur le corps d'un poisson lors de la nage. Pour illustrer leur modèle, ils ont ensuite calculé les forces hydrodynamiques s'exerçant sur un poisson (anguilliforme) nageant dans une allée BvK (formation de losange) dans différentes configurations (i.e. différentes positions du poisson dans l'allée) et en ont également conclu que les vortex présents dans l'écoulement avaient une influence significative sur l'efficacité hydrodynamique de la nage du poisson.

Nous constatons, d'après ces différents travaux, que la dynamique externe du corps lors de la nage, est fortement influencée par la nature de l'écoulement qui constitue leurs environnements. En présence d'un écoulement, les poissons adaptent naturellement leurs dynamiques internes (i.e. allures de nage) afin de pouvoir améliorer, sous certaines conditions, l'efficacité hydrodynamique de leur nage. Dans ce chapitre, nous menons donc une série d'expériences en vue d'améliorer notre compréhension des interactions hydrodynamiques impliquées lors de la nage en écoulement non-uniforme.

Nos travaux ont donc été réalisés sur la nage d'un robot anguilliforme ainsi que sur la nage d'une anguille naturelle. Dans un premier temps, une modification a été apportée au banc d'essai (présenté dans le chapitre 1), afin de pouvoir générer une allée BvK, semblable à celle

générée dans le sillage de deux poissons. Pour ce faire, nous avons conçu un système oscillant à double aileron générant une allée BvK à partir de deux allées BvK inversées. Dans un deuxième temps, nous avons effectué une étude paramétrique de la force hydrodynamique de propulsion du robot, nageant dans l'allée BvK, afin d'identifier l'effet des vortex sur l'efficacité hydrodynamique de la nage. Finalement, nous avons étudié la nage d'une anguille naturelle dans le sillage des ailerons, en analysant la dynamique interne du corps en réponse à l'écoulement, afin de mieux comprendre et de mettre en évidence un possible mécanisme d'exploitation des vortex dans de telles conditions.

4.2 Instrumentations et méthodes

4.2.1 Système d'oscillation à double aileron

Le système d'oscillation à double aileron est composé de trois parties : un servomoteur rotatif et sa partie commande, le système mécanique d'oscillation et les deux ailerons rigides de type profil d'aile symétrique.

Nous avons choisi un servomoteur rotatif "Sigma 5" de la marque "OMRON", d'une puissance de 400 W, équipé d'un réducteur de vitesse de rapport 1/10. La vitesse de rotation de l'axe du moteur peut atteindre 6000 tr/min (10 Hz en fréquence de rotation). Un automate permet de commander le moteur, à partir du logiciel "Trajexia Studio" développé par la société "OMRON". Un script de commande permet d'obtenir le mouvement d'oscillation souhaité (en amplitude et fréquence données). Le servomoteur est équipé d'un codeur optique de haute précision fixé sur l'axe de rotation du moteur. Il renvoie la position angulaire en temps réel, ce qui nous permet de contrôler le mouvement d'oscillation imposé par rapport au mouvement réel du moteur. Le système mécanique est conçu pour obtenir essentiellement, une oscillation en phase des deux ailerons (l'angle formé entre les deux ailerons est nul). Toutefois, nous avons adapté le système afin de réaliser également un mouvement d'oscillation en opposition de phase (l'angle formé entre les deux ailerons est de $\pm 2\alpha(A)$, A est l'amplitude de déplacement des ailerons). La figure 4.4 présente le système d'oscillation à double aileron, sous forme de schémas et de photos (schéma en indice 1 et photos indice 2).

Le premier aileron est relié directement à l'axe du servomoteur (axe 1). L'oscillation du deuxième est produite par une bielle qui transmet l'oscillation de l'axe 1 vers l'axe 2 (l'axe 2 est parfaitement aligné à l'axe 1, voir figure 4.4 (b_1)). La distance entre les deux ailerons peut être ajustée en faisant varier la longueur de la bielle. Pour passer d'une oscillation en phase à un mouvement en opposition de phase, nous effectuons une rotation d'un angle π de l'axe 2 et nous remplaçons la bielle par une autre ayant une longueur adaptée à cette nouvelle configuration. Les deux ailerons utilisés dans notre étude sont identiques, les dimensions sont données sur la figure 4.4 (c_1). Ils sont constitués d'une tige cylindrique composée d'acier inox à laquelle deux plaques sont soudées pour former leur allongement ainsi que leur extrémité rigide. La corde de l'aileron est $C_a = 14.4$ cm, son épaisseur au niveau du cylindre est de $D_a = 1.5$ cm (diamètre du

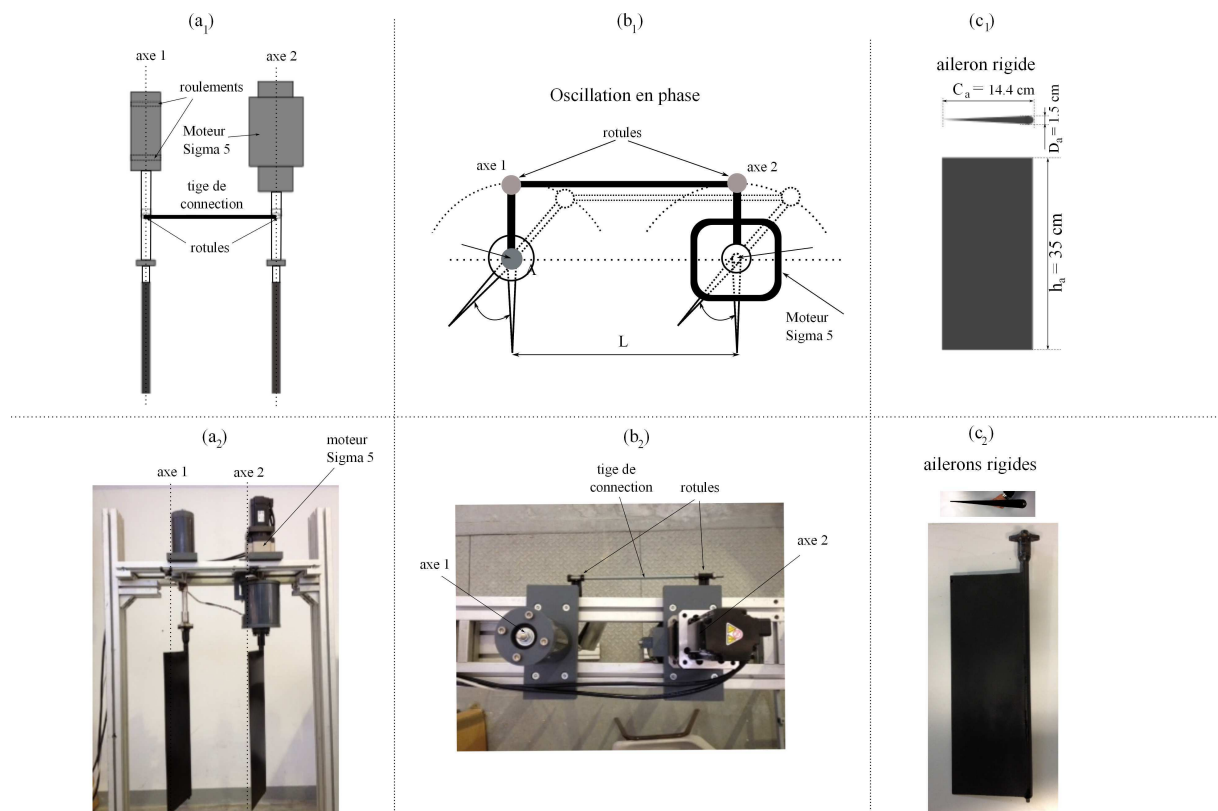


FIGURE 4.4 – Schémas et photographies du système d'oscillation à double ailerons. Vue de face, schéma (a_1) et photo (a_2). Vue de dessus, schémas des systèmes d'oscillation en phase et antiphase (b_1) et photo (b_2). Aileron rigide, schéma (c_1) et photo (c_2).

cylindre), et sa hauteur est de $h_a = 40$ cm et couvre donc quasiment toute la hauteur de l'eau dans le banc, de façon à limiter les écoulements entre les extrémités hautes (aileron / surface libre) et basses (aileron / paroi).

4.2.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est représenté sur le schéma de la figure 4.5. La section d'étude est de longueur 1.5 m, de largeur 0.6 m et de hauteur 0.45 m. Le système d'oscillation est placé sur les bords du banc d'essai, ce qui permet de le déplacer sur toute la longueur de la section de travail (suivant x). Les méthodes de mesures utilisées pour réaliser cette étude sont les suivantes :

- vélocimétrie par images de particules PIV
- mesure de forces hydrodynamiques
- acquisition vidéo et le traitement d'image.

Le dispositif regroupe toute l'instrumentation citée ci-dessus, afin de pouvoir effectuer si nécessaire les trois mesures simultanément.

Pour la PIV, le champ qui nous intéresse est le plan longitudinal en aval des ailerons à mi-hauteur entre la surface libre et la paroi du dessous. Il est éclairé à l'aide d'un laser pulsé, placé

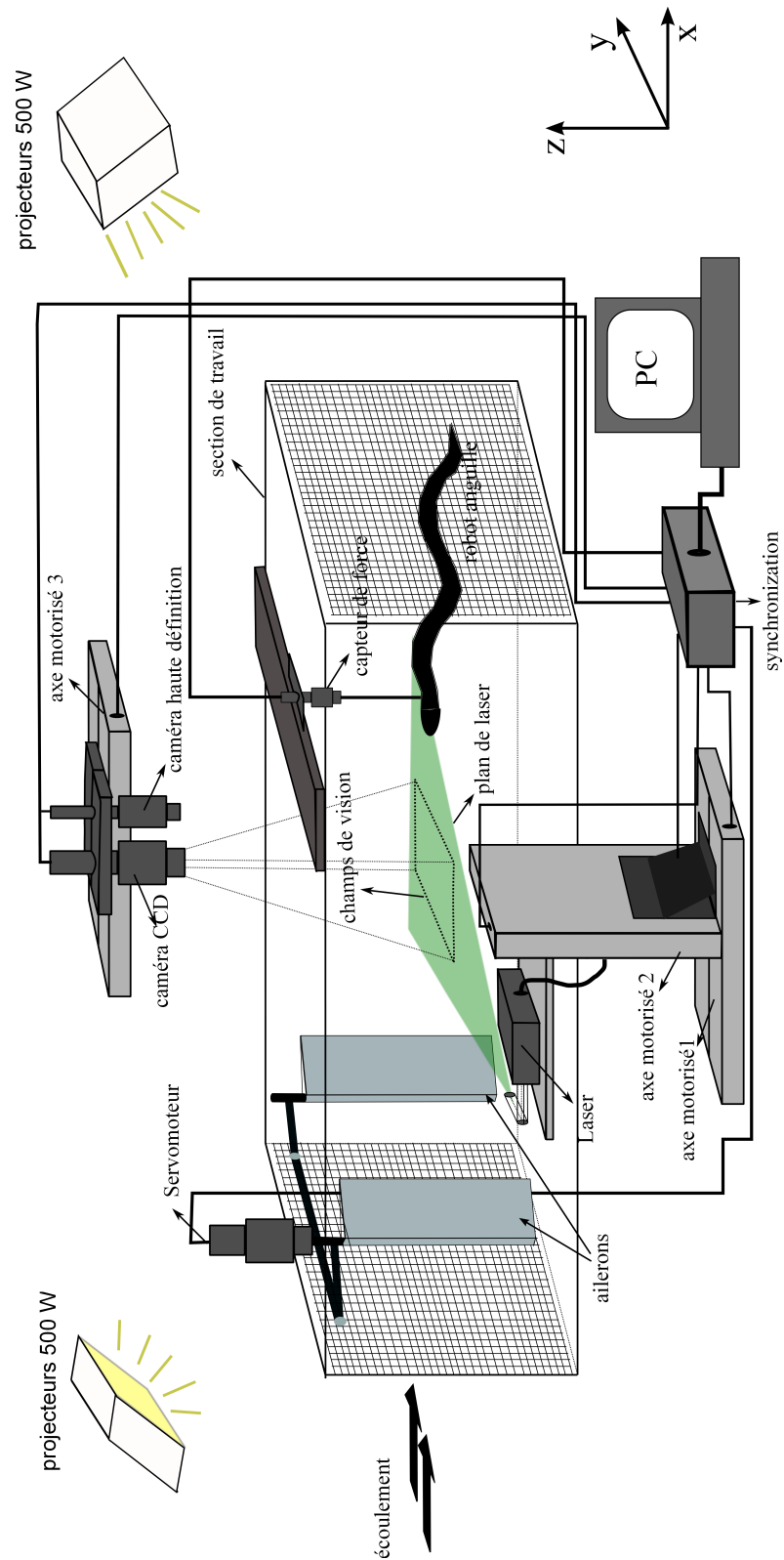


FIGURE 4.5 – Schéma du dispositif expérimental mis en place pour effectuer l'étude de l'interaction hydrodynamique.

sur un système de déplacement à deux axes motorisés qui assurent son déplacement suivant les axes x et y . La caméra CCD est placée perpendiculairement par rapport à la nappe laser, un troisième axe motorisé assure son déplacement suivant y . Les axes motorisés sont contrôlés par le même logiciel que celui du système PIV. Cette technique de mesure est utilisée pour visualiser l'écoulement généré par le système d'oscillation et pour déterminer les caractéristiques des allées BvK et BvK inversée.

Pour les mesures de forces hydrodynamiques, le capteur est placé au milieu du bassin, permettant de mesurer la force axiale F_x (suivant la direction de l'écoulement) et la force transversale F_y (perpendiculaire à la première). Nous sommes intéressés principalement à la force F_x , étant donné qu'elle représente la force de propulsion et/ou de trainée du robot. La force F_y , quant à elle, nous sert essentiellement à contrôler l'alignement du robot par rapport à la direction de l'écoulement. Le capteur est fixé sur une structure mobile, permettant de le déplacer suivant l'axe des x , le long de la section d'étude.

Pour l'acquisition vidéo et le traitement d'image, la caméra "Bastler" haute définition est fixée à proximité de la caméra CCD dédiée à la PIV. Deux projecteurs de 500 W chacun sont placés aux deux extrémités pour éclairer la plaque réfléchissante placée sur la paroi inférieure de la section de travail. Cette technique de mesure a été utilisée pour filmer et analyser les allures de l'anguille nageant dans le banc d'essai (voir chapitre 2). Durant ces travaux, nous avons utilisé une cage afin de confiner l'anguille dans une section de travail bien déterminée. Cependant, la présence de la cage dans la section de travail provoque une perturbation importante de l'allée de vortex générée par le système d'oscillation. De ce fait, nous avons alors installé deux grilles de maillages fins ($0.008 \text{ m} \times 0.008 \text{ m}$) disposées à l'entrée et la sortie de la section de travail.

La figure 4.6 présente trois photographies du dispositif expérimental : une vue de côté, une vue de dessus et une photo du système d'oscillation à double ailerons.

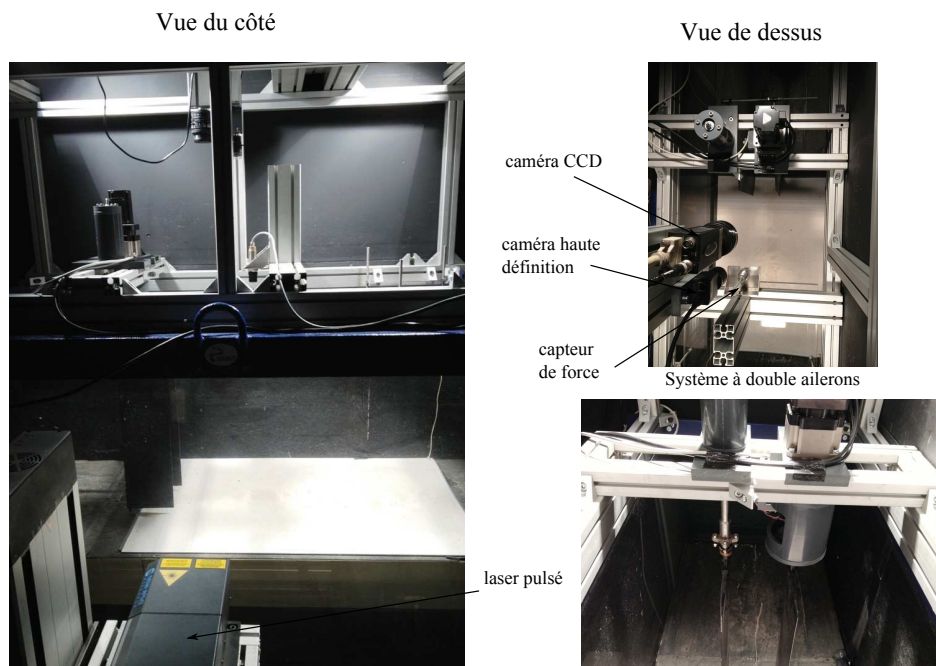


FIGURE 4.6 – Photographies de la section de travail équipée pour réaliser l'étude d'interaction hydrodynamique.

4.3 Résultats

Avant de présenter les résultats de l'étude expérimentale réalisée, nous allons caractériser l'écoulement généré par le système d'oscillation mise en place.

4.3.1 Qualification de l'écoulement tourbillonnaire dans le sillage des ailerons

Pour caractériser un écoulement tourbillonnaire dans le sillage d'un aileron, il faut d'abord imposer les paramètres du système d'oscillation pour ensuite, obtenir les paramètres de l'écoulement tourbillonnaire souhaité. La figure 4.7 présente un schéma de principe décrivant l'écoulement attendu dans le sillage du système à double ailerons.

Notons que le sillage produit par l'oscillation d'un aileron a fait l'objet de nombreuses études et la littérature portant sur le sujet est vaste. Le lecteur intéressé pourra, s'il le souhaite, se référer par exemple aux articles de review publiés par Godoy-Diana *et al.* (2008), Schnipper *et al.* (2009), Alben (2010) et Sheng *et al.* (2012).

Les systèmes d'ailerons oscillants sont généralement décrits en fonction d'un paramètre unique, le nombre de Strouhal $St_A = fA/U_\infty$, défini avec la fréquence d'oscillation f et l'amplitude A d'oscillation, ainsi que la vitesse de l'écoulement en amont U_∞ . Ce nombre est généralement utilisé pour désigner l'efficacité propulsive d'un poisson nageant. Des expériences en laboratoire avec des ailerons oscillants (Anderson *et al.* 1998 et Godoy-Diana *et al.* 2008) ont montré que l'efficacité propulsive présente un maximum pour $0.2 < St_A < 0.4$. Récemment, Eloy (2012) a calculé le nombre de Strouhal optimal pour une grande variété de poisson (de

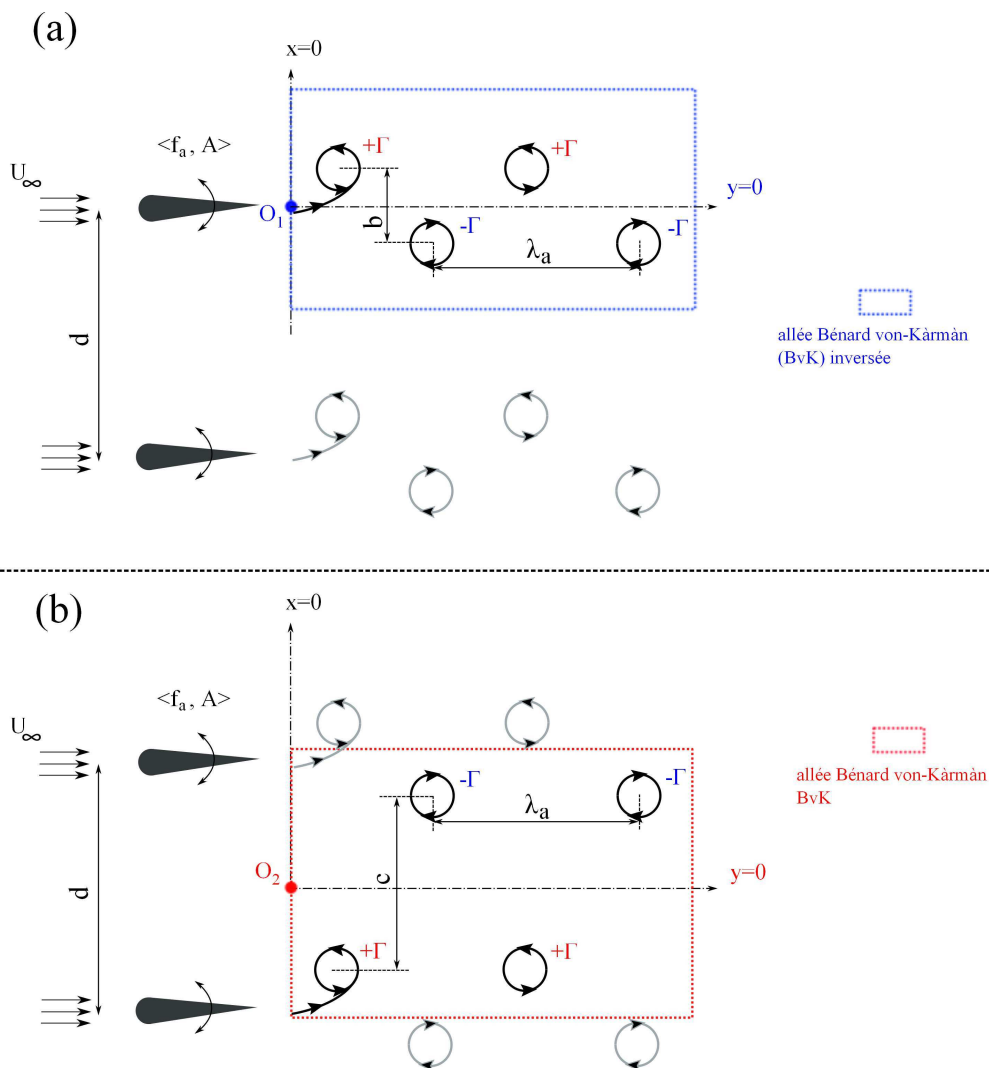


FIGURE 4.7 – Représentation schématique du sillage tourbillonnaire obtenue dans le sillage du système à double aileron. Le rectangle bleu (pointillés) représente une allée BvK inversée (a) et le rectangle en rouge (pointillés) représente une allée BvK (b).

différente tailles et morphologies). Basé sur le modèle théorique de Lighthill complété par un modèle de trainée visqueuse, il trouve que ce nombre de Strouhal est localisé dans l'intervalle $0.15 < St_A < 0.8$. Dans notre étude, nous avons choisi l'intervalle de variation du nombre de Strouhal égale à $0.2 < St_A < 0.3$, et ceci afin de limiter le nombre d'essais à effectuer.

Nous utilisons ensuite, les paramètres géométriques pour caractériser l'écoulement produit dans le sillage des ailerons. L'allée BvK inversée (rectangle en pointillés bleue - voir figure 4.7 a) est assimilée à une double rangée de vortex contrarotatifs ($+\Gamma, -\Gamma$), de longueur d'onde λ_a et de largeur b . L'allée BvK désignée par le rectangle en pointillés rouge de la figure 4.7 (b) est aussi assimilée à une double rangée de vortex contrarotatifs, de même longueur d'onde λ_a mais de largeur c qui est fonction de la distance d entre les deux ailerons. Enfin, pour caractériser les vortex, nous utilisons les trois paramètres suivants : la circulation Γ (en s^{-1}), le rayon du cœur

r_v et l'intensité de vorticité γ .

Pour chaque expérience (c.à.d. une configuration de battement $[St_A, d]$ et une vitesse d'écoulement U_∞ données), nous avons effectué des mesures PIV dans le sillage des ailerons. Dans ce cas, deux fenêtres de visualisation sont respectivement utilisées pour l'allée BvK inversée (rectangle pointillé de couleur bleue, centré en O_1) et l'allée BvK (rectangle pointillé de couleur rouge, centré en O_2), à partir desquelles nos mesures ont été réalisées (voir figure 4.7). Ils s'étendent de 0 à $16.7 D_a$ en x , et de $\pm 6.7 D_a$ en y (D_a correspond au diamètre du cylindre constituant l'axe de rotation de l'aileron). La résolution de la caméra est de 1600 par 1200 px, et la fréquence d'acquisition est de 15 Hz.

Plusieurs configurations de battement $[St_A, d]$ ont été étudiées. Seule la configuration suivante a été retenue pour la suite : la vitesse de l'écoulement en amont est de $U_\infty = 0.22$ m/s, le nombre de Strouhal est de $St_A = 0.245$ pour une fréquence de battement $f_a = 1.1$ Hz, une amplitude $A = 0.049$ m et d'une distance entre les deux ailerons $d = 0.25$ m.

Les figures 4.8 et 4.9 présentent les résultats PIV obtenus respectivement pour les allées BvK et BvK inversée. Nous présentons sur chaque figure, les vecteurs vitesse superposés au champ de gradient de vitesses et le champ de vorticité associé. En complément, un suivi temporel de l'allée est présenté pour une période d'oscillation complète.

Nous déduisons d'après les résultats PIV obtenus, les paramètres de l'écoulement :

- Caractéristiques géométriques de l'allée BvK inversée : la longueur d'onde $\lambda_a \simeq 0.23$ m, la largeur $b \simeq 0.04$ m.
- Caractéristiques géométriques de l'allée BvK : la longueur d'onde est la même que celle de BvK inversée $\lambda_a \simeq 0.23$ m et la largeur est de $c \simeq 0.18$ m.
- Caractéristique des tourbillons : la circulation $\Gamma = 42.5$ s⁻¹, le rayon du cœur (mesuré sur le champs de vorticité) $r \simeq 1$ cm et l'intensité de vorticité $\gamma \simeq 0.014$ m²rd/s.

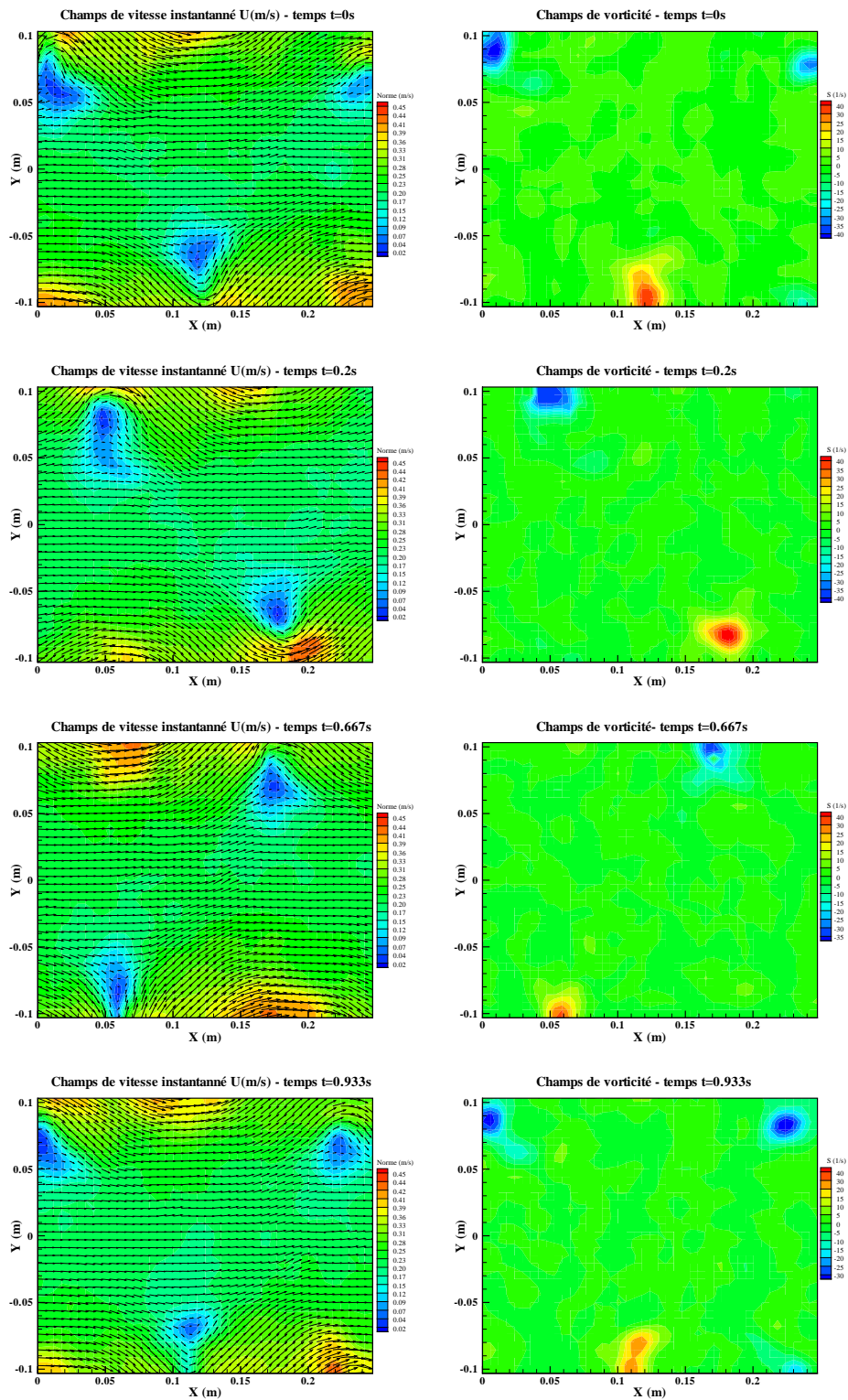


FIGURE 4.8 – L'allée BvK générée dans le sillage des deux ailerons. À gauche, vecteurs vitesse (avec en arrière plan la norme des vitesses). À droite, le champs de vorticité correspondant. De haut vers le bas, les quatre clichés représentent le suivi temporel de l'allée pour une période d'oscillation.

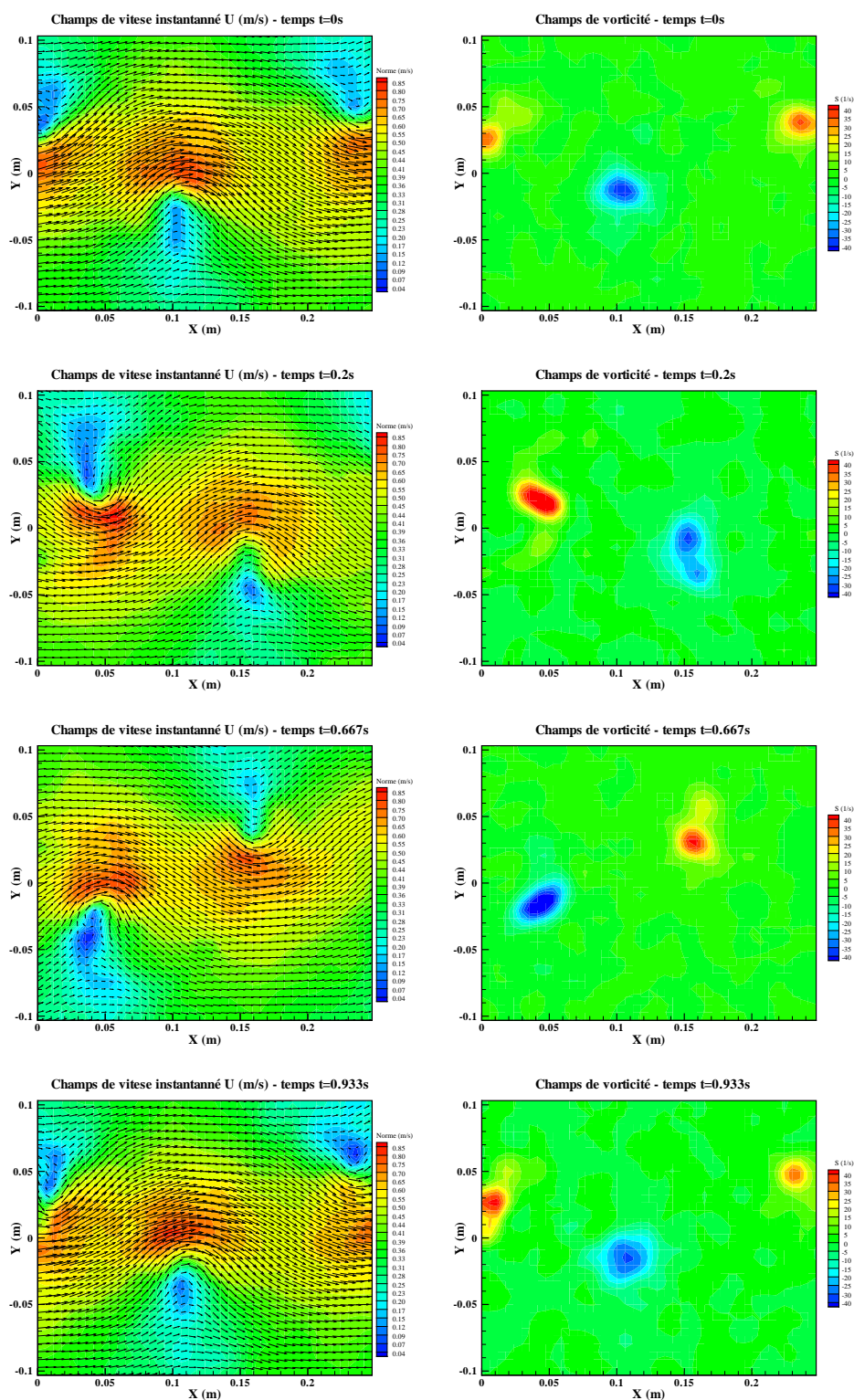


FIGURE 4.9 – L' allée BvK inversée générée dans le sillage d'un aileron. À gauche, vecteurs vitesse (avec en arrière plan la norme des vitesses). À droite, le champs de vorticité correspondant. De haut vers le bas, les quatre clichés représentent le suivi temporel de l'allée pour une période d'oscillations.

4.3.2 Nage de l'Amphibot III dans une allée de Bénard Von-Kàrmàn BvK

Nous présentons dans cette section une étude paramétrique de la force de propulsion produite lors de la nage d'un robot nommé "Amphibot III" placé dans un écoulement de type BvK, en vue de mettre en évidence l'influence des interactions hydrodynamiques.

Robot Amphibot III et instrumentation

Amphibot III est un robot inspiré de la lamproie et il succède à deux générations d'Amphibot (I et II). Il a été conçu par nos partenaires Suisse de l'équipe BIOROB de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL. Le robot est composé de plusieurs modules de 8 cm de longueur chacun et d'une nageoire caudale également de 8 cm de longueur. Dans notre cas, il est composé de six modules, ce qui est suffisant pour reproduire une nage anguilliforme. Le robot est contrôlé par une C.P.G. ("Central Pattern Generator") réglant la locomotion des vertébrés (les modules) pour la production de l'oscillation le long du corps. Sa nage est contrôlée à partir de trois paramètres d'entrées : les amplitudes maximales d'oscillations de la tête et la queue, la fréquence et la longueur d'onde. La commande du robot se fait à distance (sans fil) et nous pouvons l'immerger à 30 cm maximum en dessous de la surface de l'eau (profondeur limite pour communiquer avec le robot). L'intérêt de ce robot réside dans son informatique embarquée qui reproduit *in situ* le fonctionnement d'une moelle épinière (d'un poisson vertébré) de plusieurs classes de robots grâce à un réseau de neurones (Crespi et Ijspeert 2008). Dans notre cas, la loi d'ondulation imposée au robot est une fonction sinusoïdale de fréquence f_r , d'une longueur d'onde λ_r et d'une amplitude croissante (exponentiellement) de la tête (où elle est quasi-nulle) vers la queue (amplitude maximale A_r).

Le robot est relié au capteur de force à l'aide d'une tige, d'extrémité rigide, fixée sur le deuxième module (du robot) proche de la tête. Il est placé en position médiane dans l'allée BvK, à mi-hauteur de la section de travail. La figure 4.10 montre une photo du robot en vue de dessus et une deuxième photo (vue d'arrière), nageant dans le sillage des ailerons.

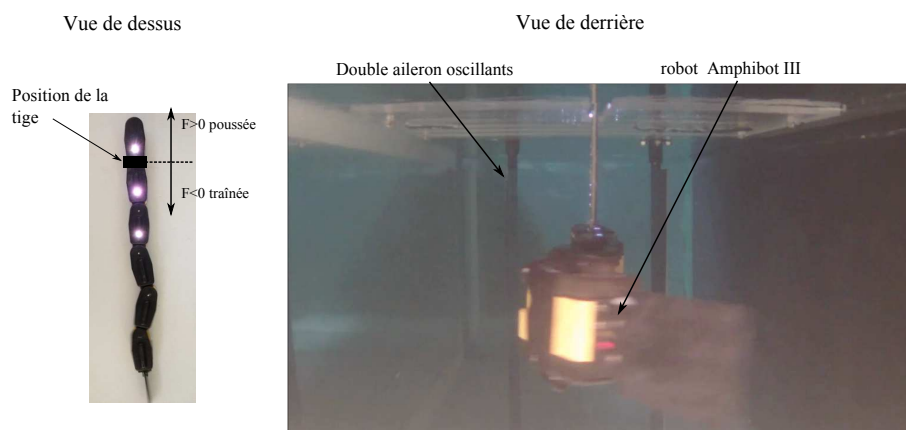


FIGURE 4.10 – Photographies du robot Amphibot III. À gauche, une vue de dessus. À droite, la nage du robot dans l'allée tourbillonnaire des ailerons (photo sous marine).

Les paramètres de la loi de déformation imposée au robot sont les suivants : la fréquence f_r (définie plus tard), la longueur d'onde $\lambda_r = L_r$ ($L_r = 0.56$ m longueur du robot) et l'amplitude qui augmente exponentiellement de la tête (amplitude très faible $\simeq 0$) vers la queue ($A_r = c/2$).

Contexte de l'étude

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction de ce chapitre, lors de la nage en groupe, un poisson placé en aval de deux autres poissons nageant côte à côte peut améliorer, sous certaines conditions, la performance hydrodynamique de sa nage. Le but de cette étude est de vérifier l'hypothèse ci-dessus, en effectuant une étude expérimentale sur la nage du robot (Amphibot III) dans l'allée BvK.

D'un point de vue pratique, le contexte de l'étude se présente comme suit :

- premièrement, nous imposons une condition de départ, celle de la nage synchronisée du robot dans l'allée BvK. C'est à dire, la fréquence d'ondulation du robot est égale à la fréquence d'oscillation des ailerons (fréquence de détachement des tourbillons) $f_r = f_a$.
- Deuxièmement, nous faisons varier la "phase" entre le robot et l'allée BvK, cela afin d'identifier dans un premier temps l'effet des vortex sur la nage, et dans un second temps, de vérifier si pour certains "déphasages" l'efficacité hydrodynamique du robot augmente.

Notons que dans cette étude, nous définissons la phase φ (voir figure 4.11 a) comme la distance qui sépare le maximum de l'onde propagée sur le robot et le centre d'un vortex de l'allée BvK (ici le vortex de rotation négative).

D'une manière formelle, nous considérons que l'allée BvK est une fonction périodique de période T^f , telle que

$$f_T^f \left(\frac{2\pi x}{\lambda_a} + 2\pi t/T^f \right). \quad (4.1)$$

De même, la loi de commande du robot est une fonction périodique de période T^r et de déphasage φ par rapport à l'écoulement externe :

$$f_T^r \left(\frac{2\pi X}{\lambda_r} + 2\pi t/T^r + \varphi \right). \quad (4.2)$$

Pour réaliser notre étude paramétrique, nous souhaitons faire varier φ dans la loi de commande, en temps réel², afin d'obtenir une configuration du robot par rapport à l'allée comme l'exemple illustré sur la figure 4.11 (b). Cependant, la commande du robot ne permet pas d'effectuer le déphasage $\Delta\varphi$ en temps réel. De ce fait, nous avons traité notre problème en utilisant une approche alternative. On peut en effet montrer de manière rigoureuse, qu'il est analogue d'imposer un déphasage $\Delta\varphi$ dans la loi de mouvement imposée au corps, comme montré sur la figure 4.11 (b), ou de déplacer le robot d'une distance $\Delta x = f(\Delta\varphi)$ dans le référentiel lié au laboratoire (comme montré sur la figure 4.11 c). En effet, si on déplace le robot d'une distance équivalente à la longueur d'onde de l'allée λ_a , le robot reviendra à sa configuration de départ (figure 4.11

2. Tous les mesures doivent avoir le même instant initial t_0

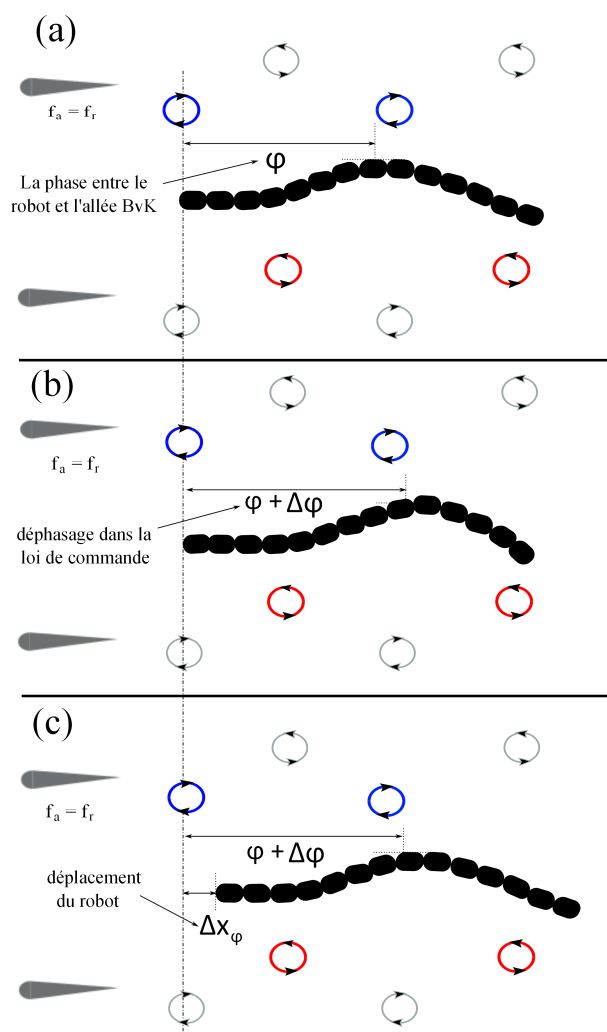


FIGURE 4.11 – Schémas de configurations entre le robot et l’allée BvK : la configuration de référence (a), déphasage impliqué par la loi de commande et (c) déphasage par le déplacement du robot dans le référentiel lié au laboratoire.

a), ce qui correspond à un déphasage de 2π dans la loi de commande et nous permet de déduire que $\Delta x = \lambda_a \Delta\varphi / 2\pi$.

Pour la suite de cette étude, nous avons donc fait varier la phase en déplaçant le robot dans le référentiel lié au laboratoire. Les résultats obtenus sont présentés dans la section suivante.

Forces d’interactions hydrodynamiques

Les deux forces mesurées à l’aide du capteur sont la force axiale (F_x), parallèle à la direction de l’écoulement et la force latérale (F_y), perpendiculaire à ce dernier. On utilise comme convention de signe : $F_x < 0$ correspond à une force appliquée dans le même sens de l’écoulement et $F_x > 0$ dans le sens contraire. Le capteur mesure des valeurs de tension (en volts) pour une fréquence d’acquisition maximale de 1 kHz, qui sont ensuite converties en valeurs réelles (i.e. en

Newton) à l'aide d'un convertisseur (suivant une courbe d'étalonnage prédéfinie). L'acquisition de ces mesures en temps réel se fait sous Labview qui permet de modifier la fréquence ($f_{\text{échant}}$) et la durée ($T_{\text{échant}}$) d'échantillonnage souhaitées. Chaque échantillon de mesure est analysé sous le logiciel de calcul Matlab (environnement Mathworks). La figure 4.12 (a) montre un exemple du signal temporel discret de la force axiale mesurée lors de la nage du robot dans l'allée BvK. Le signal est mesuré à une fréquence d'échantillonnage de $f_{\text{échant}} = 20$ Hz et un nombre d'échantillon de $N_{\text{échant}} = 2^{10} = 1024$, la force moyenne est présentée par la ligne horizontale (rouge) (figure 4.12 a).

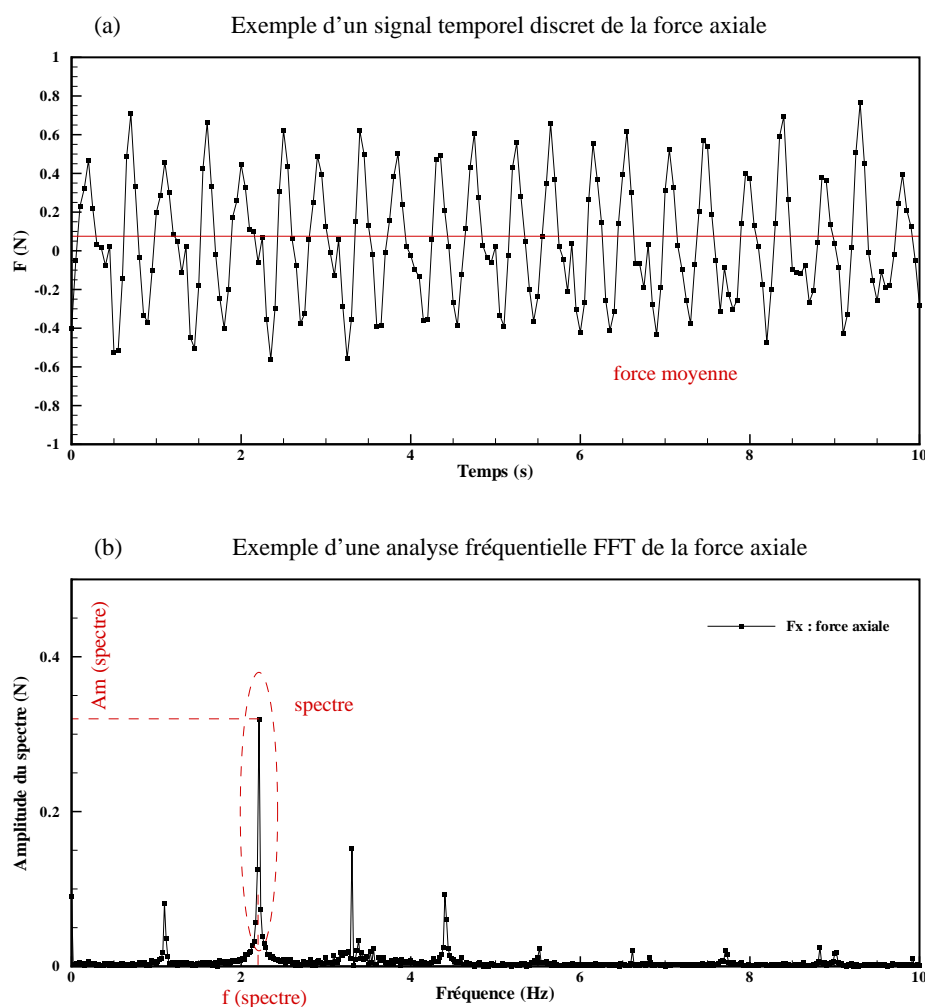


FIGURE 4.12 – Exemple d'un signal de la force axiale de la nage du robot dans un écoulement uniforme (a) et l'analyse spectrale correspondante par FFT (b).

Comme nous le remarquons, le signal temporel est un signal quasi périodique. Il présente une répétition du signal au cours du temps suite à un ou plusieurs phénomènes périodiques externes. De ce fait, il a été utile d'effectuer une transformation du domaine temporel au domaine

fréquentiel, afin que l'on puisse identifier la nature périodique du signal mesuré. Cette transformation se fait généralement par l'algorithme de Transformée de Fourier Rapide (en anglais, "*Fast Fourier Transform*" **FFT**).

La figure 4.12 (b) montre un exemple de l'analyse fréquentielle du signal temporel de la force (présenté en a). Chaque spectre est identifié par une amplitude qui est exprimée en Newton (N) et correspond à une fréquence f d'oscillation. Ce signal présente cinq fréquences prépondérantes que nous allons identifier au cours de cette étude. Un spectre dans une analyse FFT décrit en général un phénomène physique lié à un effet hydrodynamique, ou bien, une propriété liée au système de mesure et encore quelque bruits et signaux parasites. Les fréquences de nage du robot et de l'écoulement (allée BvK) peuvent donc être identifiées à partir de l'analyse FFT de signaux temporels.

Cette étude a été réalisée en suivant le protocole expérimental, présenté dans le tableau 4.1, composé de deux parties principales :

- (1) La première consiste à identifier les caractéristiques hydrodynamiques du robot (force de trainée, propulsion...) ainsi que les fréquences (ondulation) de nage du robot et du lâcher des vortex de l'allée BvK.
- (2) La deuxième est dédiée à l'étude paramétrique de l'interaction hydrodynamique entre la nage du robot et l'écoulement tourbillonnaire externe.


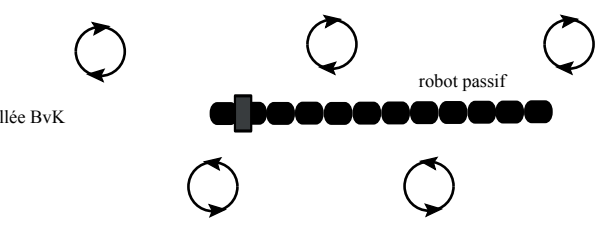

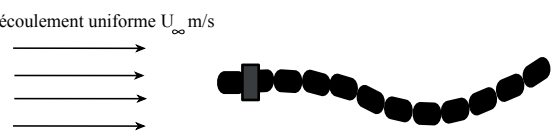
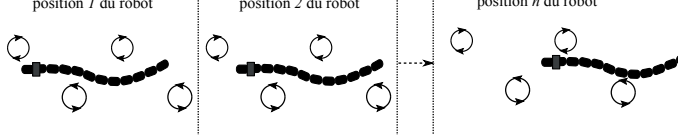
Identification des caractéristiques hydrodynamiques du robot, la fréquence de nage du robot et la fréquence d'oscillation des ailerons

Dans cette partie, toutes les forces sont présentées sous formes de signaux temporels et signaux fréquentiels, mesurés pour un nombre d'échantillonnage de 1024 et une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz.

Les deux premières expériences sont effectuées lorsque le robot est en mode passif (sans nage), placé dans deux conditions d'écoulements différentes : écoulement uniforme et allée BvK. Les forces axiales (F_x) et latérales (F_y) mesurées, sont présentées respectivement sur les figures 4.13 et 4.14 pour ces deux premières expériences. Dans le cas d'un écoulement uniforme, la force axiale (voir figure 4.13 a) représente la trainée hydrodynamique du robot, dont la valeur moyenne est de $F_{trainee} = -0.088$ N.

Lorsque nous imposons un écoulement externe tourbillonnaire, nous constatons que la moyenne de la force de trainée ne varie pas significativement, mais que l'oscillation de la force est plus importante. D'après l'analyse FFT de la force latérale (voir figure 4.14), une fréquence dominante à $f_1 = 1.09 \pm 0.02$ Hz apparaît en comparaison avec l'écoulement uniforme. Cela s'explique par l'oscillation périodique du signal temporel (des forces F_x et F_y) due à la présence des vortex dans

TABLE 4.1 – Protocole expérimental

(1) Identification des caractéristiques hydrodynamiques du robot, la fréquence d'ondulation et la fréquence de lâcher des vortex	
force de traînée axiale: $F_{trainee} \text{ (N)}$	 <p>écoulement uniforme U_{∞} m/s</p> <p>robot passif</p>
fréquence d'oscillation du système à double aileron: $f_a \text{ (Hz)}$	 <p>allée BvK</p> <p>robot passif</p>
force de propulsion nette : $F_{prop}^1 \text{ (N)}$	 <p>fluide au repos $U_{\infty}=0$</p> <p>robot actif</p>
fréquence d'ondulation du robot: $f_r \text{ (Hz)}$	
force de propulsion dans un écoulement uniforme: $F_{prop}^2 \text{ (N)}$	 <p>écoulement uniforme U_{∞} m/s</p>
(2) Etude paramétrique de la force d'interaction entre le robot et l'allée BvK	
force de propulsion dans un écoulement BvK en fonction du déphasage: $F(\varphi) \text{ (N)}$	 <p>position 1 du robot</p> <p>position 2 du robot</p> <p>position n du robot</p>
Essai N°1:	Essai N°2
t_0^1 (temps initial de l'essai) $f_{echant} = 200 \text{ Hz}$ $t_{mesure} = 30.7 \text{ s}$ (temps de mesure pour une seule position)	t_0^2 (temps initial de l'essai) $f_{echant} = 200 \text{ Hz}$ $t_{mesure} = 30.7 \text{ s}$
Essai N°3:	
t_0^3 (temps initial de l'essai) $f_{echant} = 20 \text{ Hz}$ $t_{mesure} = 51.3 \text{ s}$	

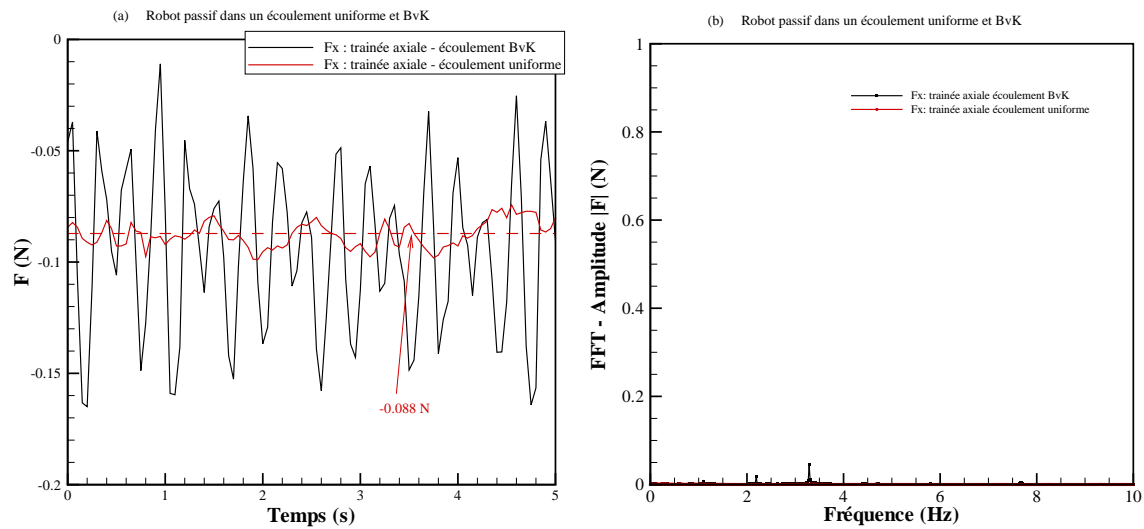


FIGURE 4.13 – Forces de trainées axiales (F_x) exercées respectivement par un écoulement uniforme et un écoulement tourbillonnaire BvK sur le robot en mode passif (pas de nage du robot). (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.

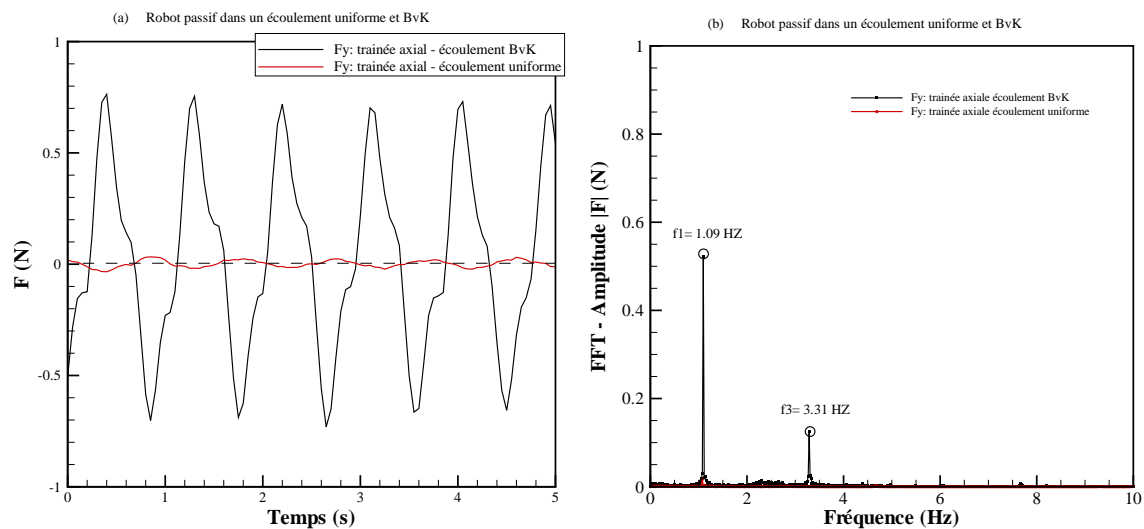


FIGURE 4.14 – Forces latérales (F_y) exercées respectivement par un écoulement uniforme et un écoulement tourbillonnaire BvK sur le robot en mode passif (pas de nage du robot). (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.

l'écoulement incident. Cette oscillation étant une réponse à la sollicitation des vortex, elle nous permet d'en déduire que la fréquence effective d'oscillation des ailerons est de $f_a = 1.09 \pm 0.02$ Hz. Notons aussi que la moyenne de la force latérale est quasiment nulle dans les deux cas, cela confirme le bon alignement du robot dans l'écoulement.

Les troisième et quatrième expériences sont effectuées lorsque le robot est en mode actif

(i.e. le robot nage) et placé dans deux conditions d'écoulements : fluide au repos et écoulement uniforme. Les figures 4.15 et 4.16 présentent respectivement les forces axiales (F_x) et latérales (F_y) obtenues.

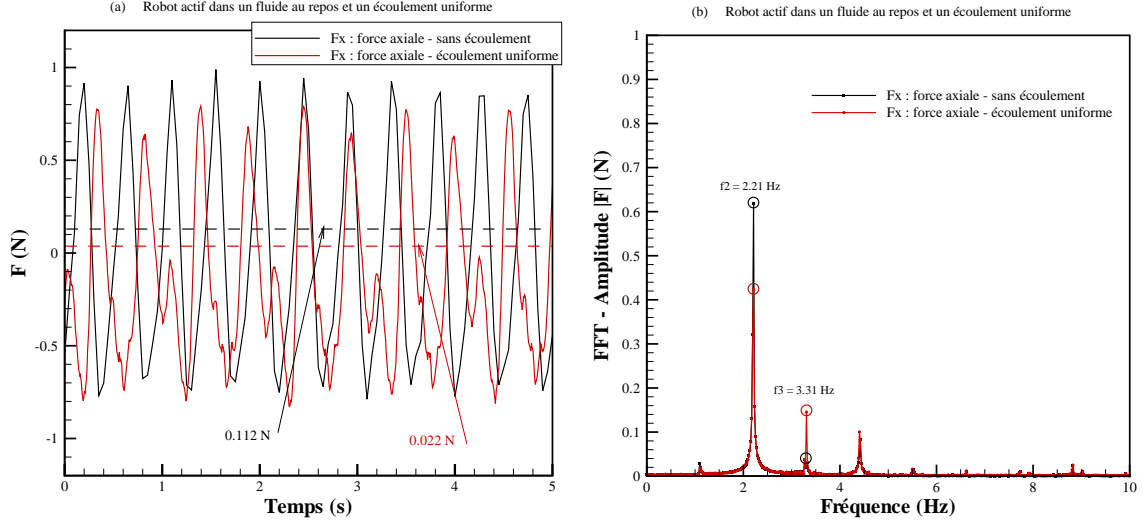


FIGURE 4.15 – Forces de propulsions axiales (F_x) exercées par le robot respectivement dans un fluide au repos et dans un écoulement uniforme. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.

Dans le cas d'un fluide au repos, la force axiale (voir figure 4.15 a) représente la propulsion nette (sans les effets de frottements visqueux) du robot et sa valeur moyenne est de $F_{prop}^1 = 0.112$ N. En présence d'un écoulement uniforme, la moyenne de la force propulsive diminue à cause des effets visqueux et devient $F_{prop}^2 = 0.022$ N.

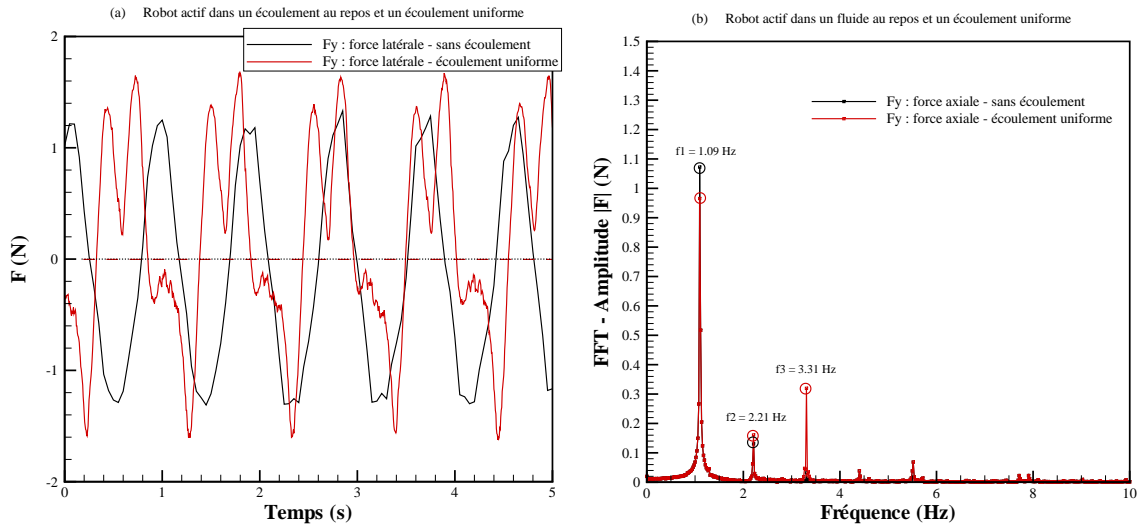


FIGURE 4.16 – Forces latérales (F_y) exercées par le robot respectivement dans un fluide au repos et dans un écoulement uniforme. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.

De même que pour les deux premières expériences, la moyenne de la force latérale est nulle dans les deux cas (voir figure 4.16 a), ce qui confirme ici aussi le bon alignement du robot. Lorsque le robot nage dans un fluide au repos, nous remarquons que le spectre d'amplitude dominante de la force axiale (spectre de fréquence $f_1 = 1.09 \pm 0.02$ Hz), est d'une fréquence double par rapport à celui de la force latérale (spectre de fréquence $f_2 = 2.21 \pm 0.02$ Hz). Ces deux fréquences, 1.09 ± 0.02 Hz (de la force latérale) et 2.21 ± 0.02 Hz (de la force axiale), correspondent respectivement au simple et double de la fréquence d'ondulation du robot, comme montré par Kern et Koumoutsakos (2006). Nous déduisons donc que la fréquence d'ondulation du robot est également de l'ordre de $f_r = 1.09 \pm 0.02$ Hz. Enfin, le spectre de fréquence 3.31 ± 0.03 Hz observé dans tous les signaux n'est pas lié à une sollicitation hydrodynamique, mais représente le premier mode de vibration mécanique de notre système tige/robot. (Cela a été vérifié lors d'un essai utilisant la méthode de la réponse impulsionnelle).

Pour résumer cette première partie d'expérience, voici donc un récapitulatif des résultats obtenus :

- la force de trainée hydrodynamique du robot est de $F_{trainee} = -0.088$ N
- les forces de propulsions du robot, avec et sans les effets visqueux, sont respectivement égale à $F_{prop}^1 = 0.112$ N et $F_{prop}^2 = 0.022$ N
- la nage du robot et l'oscillation du système d'ailerons sont synchronisées la fréquence $f_a = f_r = 1.09 \pm 0.02$ Hz.

Étude paramétrique de la force d'interaction entre le robot et l'allée BvK

Dans cette partie, nous nous concentrerons sur la nage du robot dans l'écoulement tourbillonnaire de type BvK. Avant de présenter l'étude paramétrique réalisée, les figures 4.17 et 4.18 présentent un exemple des signaux temporels et fréquentiels des forces mesurées durant la nage du robot dans l'allée BvK.

En effectuant une comparaison entre les signaux de forces mesurés lors de la nage du robot dans un écoulement uniforme (voir figures 4.15 et 4.16) et dans l'allée BvK (voir figures 4.17 et 4.18), on déduit que :

- l'amplitude du spectre de fréquence 2.21 ± 0.02 Hz de la force axiale a diminué de 0.62 N, dans le cas d'un écoulement uniforme, à 0.5 N (dans une allée BvK)
- l'amplitude du spectre de fréquence 1.09 ± 0.02 Hz de la force latérale a augmenté de 1.08 N à 1.23 N.

Nous déduisons donc que la présence des vortex a un effet significatif sur la force de propulsion du robot. Dans ce cas, l'effet est négatif sur la force de propulsion, et sa moyenne est plus faible par rapport à la nage dans un écoulement uniforme. Rappelons que dans cette expérience, la configuration relative du robot par rapport à l'écoulement externe (position des vortex à l'instant initial) est choisie de manière arbitraire. Cette configuration est à l'origine de l'effet négatif car,

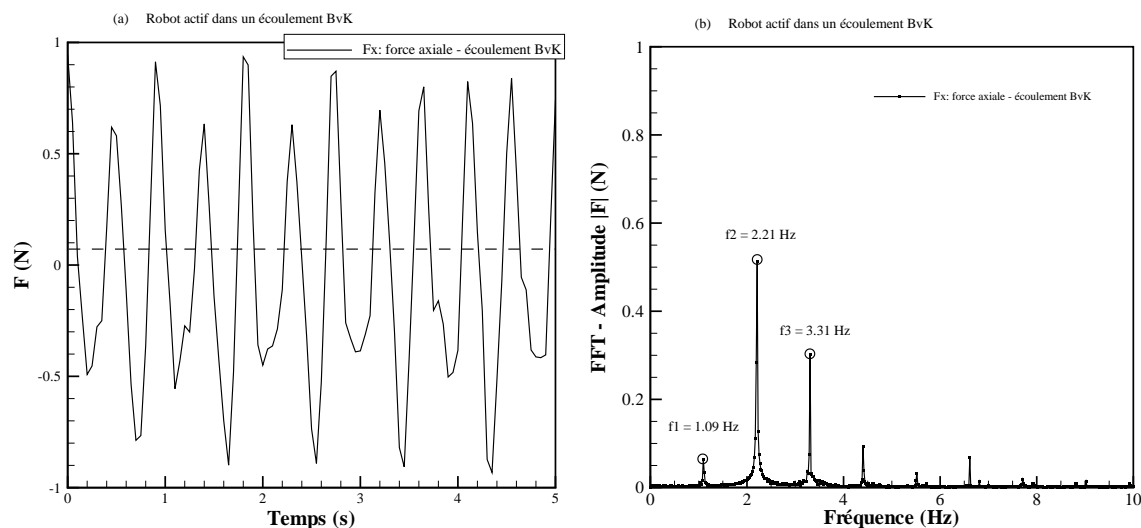


FIGURE 4.17 – Force axiale (F_x) exercées par le robot dans un écoulement tourbillonnaire de type BvK. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.

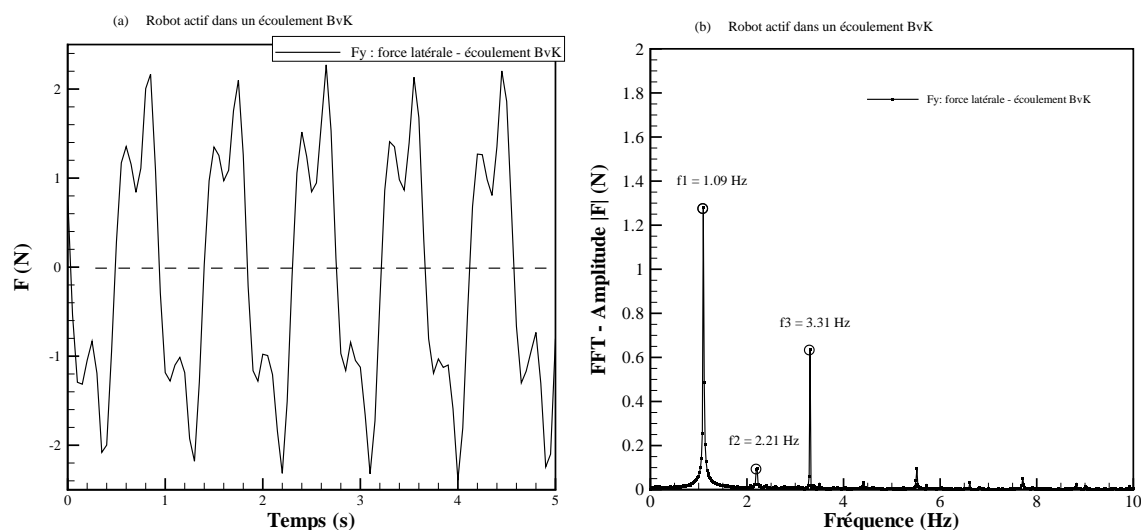


FIGURE 4.18 – Force latérale (F_y) exercées par le robot dans un écoulement tourbillonnaire de type BvK. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.

à priori, le robot en nage synchronisé avec l'allée BvK se trouvait dans une mauvaise position par rapport aux vortex de l'allée BvK. Pour renforcer cette hypothèse, nous avons réalisé l'étude paramétrique de la force d'interaction entre le robot et l'allée BvK de l'écoulement externe.

Trois séries d'expériences ont été réalisées, pour lesquelles, les paramètres de l'allée BvK et ceux de la loi de commande du robot sont toujours identiques à ceux utilisés dans la section précédente.

Pour les deux premières essais (N°1 et N°2), la fréquence d'échantillonnage de la mesure de

force est égale à $f_{echant} = 200$ Hz. Cette augmentation de la fréquence peut être faite puisqu'elle n'impacte pas significativement la valeur moyenne des forces mesurées. Dans ce cas, le temps nécessaire à la mesure de 1024 valeurs est faible (5.12 s). Nous avons donc choisi de l'étendre à 30.7 s ce qui correspond à six échantillons, soit 6144 valeurs. Le temps t_0^i correspond à l'instant initial de l'essai N°i. Il a été pris en compte durant l'analyse des résultats, car la configuration initiale φ_0 (robot/allée BvK) varie d'un essai à l'autre (les démarrages du système d'ailerons et du robot ne sont pas simultanés). Au total, pour chaque essai, neuf positions du robot sont étudiées avec un pas de $\Delta x_\varphi = 0.03$ m. Les figures 4.19 (a) et (b) présentent respectivement les courbes des forces moyennes du robot en fonction de sa position x pour les deux essais N°1 et 2. Notons que ces deux essais ont été effectués dans les mêmes conditions expérimentales, afin d'effectuer, en plus, une étude de reproductibilité.

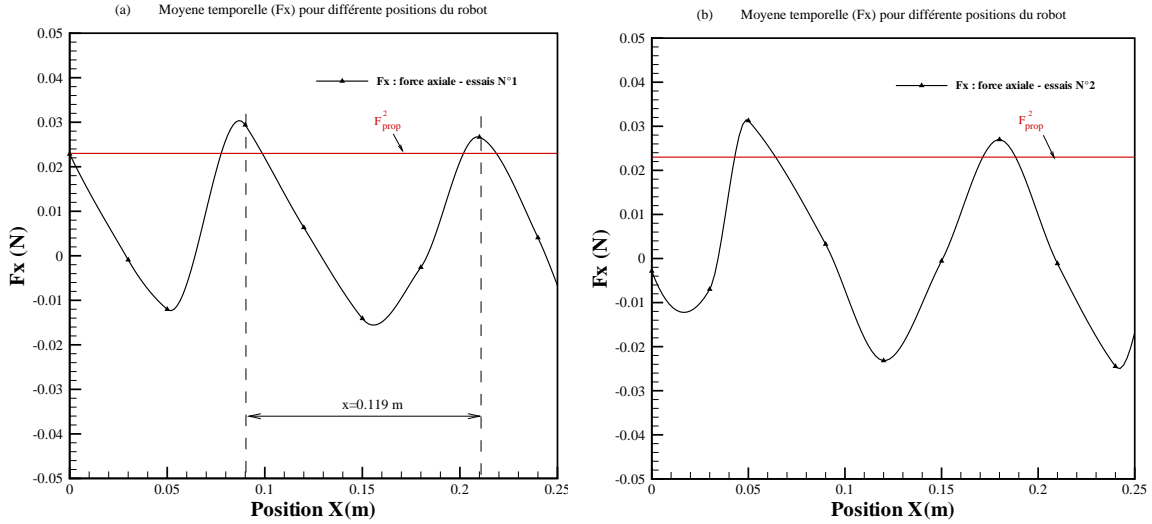


FIGURE 4.19 – Forces axiales moyennes en fonction de la position du robot par rapport au vortex de l'écoulement externe. Les deux courbes (a) et (b) représentent deux expériences réalisées dans les mêmes conditions, exception faite du temps initial t_0 .

Les courbes sont tracées par une interpolation de type "Akima" générée à l'aide d'une fonction existante dans le logiciel de visualisation graphique "Tecplot 360". Cette interpolation permet d'avoir une visualisation de la variation de force en fonction de la position relative du robot dans l'écoulement BvK. La force moyenne (F_{prop}^2), représentée en rouge, est utilisée comme valeur de référence pour notre étude. D'après la figure 4.19 (a), lorsque nous faisons varier la position du robot, la force moyenne varie d'une force propulsive $F_{max} > 0$ à une force de trainée $F_{min} < 0$. Ce phénomène est périodique d'une période $T_{\Delta\varphi_1}$ tels que, $\Delta\varphi_1 = \Delta x_{\varphi_1} 2\pi/\lambda_a$ (avec $\Delta x_{\varphi_1} = 0.119$ m). Le même résultat est obtenu dans le deuxième essai, sauf que, le décalage de phase observé entre les deux courbes est expliqué par la différence des temps initiaux $t_0^1 \neq t_0^2$ (la configuration initiale est différente entre les deux essais). Nous déduisons alors la répétabilité de nos résultats.

D'après la figure 4.19 (a), lorsque on déplace le robot d'une distance de 9 cm environ de

sa position initiale, la force de propulsion mesurée sur le robot devient maximale, et dépasse la capacité maximale de propulsion du robot dans un écoulement uniforme (égale à $0.022N$). Ensuite, la force diminue pour atteindre un minimum (d'une valeur négative) pour ensuite augmenter et dépasser à nouveau la valeur de référence (0.022 N). On constate alors, dans ce cas, que pour ces deux positions ($x = 9\text{ cm}$ et $x = 21\text{ cm}$) le robot profite de l'énergie de l'écoulement tourbillonnaire et sa force de propulsion est plus importante que lorsqu'il nage dans un écoulement uniforme. Nous remarquons aussi qu'à la deuxième position ($x = 21\text{ cm}$), la force est plus faible que celle mesurée à la première position ($x = 9\text{ cm}$). Ceci est due du fait qu'on éloigne durant l'expérimentation le robot des ailerons, où les vortex de l'allée BvK sont mieux développés.

Par ailleurs, la période de la variation de la force moyenne en fonction de la différence de phase est différente de la valeur attendue ($\Delta\varphi = 2\pi$). Comme nous l'avons mentionné précédemment, dans la section 4.3.2, une période complète de différence de phase est équivalente au déplacement du robot sur une distance égale à la longueur d'onde de l'allée BvK, soit ici $\Delta x_\varphi = \lambda_a = 0.23\text{ m}$. Or, la période obtenue dans nos essais correspond à un déplacement du robot de $\Delta x_{\varphi_1} = 0.119\text{ m}$. Nous pensons d'après une approche théorique menée, et présentée dans l'annexe C, que ce phénomène est peut être dû à une légère différence entre la fréquence d'oscillation des ailerons et la fréquence d'ondulation du robot, estimée de l'ordre de 10^{-3} . Cette différence de fréquence présente une influence sur la période de la variation de la force moyenne, notamment, lorsque le temps de mesure utilisé durant l'expérimentation est important.

Afin de valider cette hypothèse, nous avons effectué une troisième série d'expériences (Essai N°3, voir le tableau 4.1) dans les mêmes conditions que les deux premières séries (N°1 et 2), exception faite pour le temps de mesure t_{mesure} qui est passé de 30.7 s à 51.3 s . La figure 4.20 présente la courbe des forces moyennes correspondant à l'essai N°1 (même courbe présentée dans la figure 4.19 (a)) et la bleue, les forces moyennes obtenues lors de l'essai N°3.

Nous observons que la force moyenne de l'essai N°3 est périodique d'une période qui correspond maintenant à un déplacement de $\Delta x_{\varphi_3} = 0.088\text{ m}$. La période a donc diminuée lorsque le temps de mesure a augmenté. Comme nous ignorions qu'un déphasage se produisait au moment des mesures, il n'a pas été pris en compte dans les valeurs de phase correspondante à chaque force moyenne. Cela signifie que, les valeurs de phases (de chaque position x) présentées dans nos graphes ne correspondent pas aux valeurs de phase réelles du robot par rapport l'allée BvK. Par conséquent, si on prend en compte ce déplacement fictif causé par la différence de fréquence, nous devons obtenir une période pour un déphasage de 2π .

La différence de fréquence entre l'ondulation du robot et l'oscillation des ailerons n'a pas affecté l'allure de la courbe des forces moyennes de propulsion. Dans les deux essais (N°1 et N°3), la force atteint un maximum plus grand que la force de propulsion du robot durant la nage dans un écoulement uniforme. De plus, l'allure de la courbe est semblable dans les deux cas. Nous pouvons donc confirmer que nos résultats sont significatifs.

Notre étude expérimentale sur l'interaction hydrodynamique survenant lors de la nage d'un

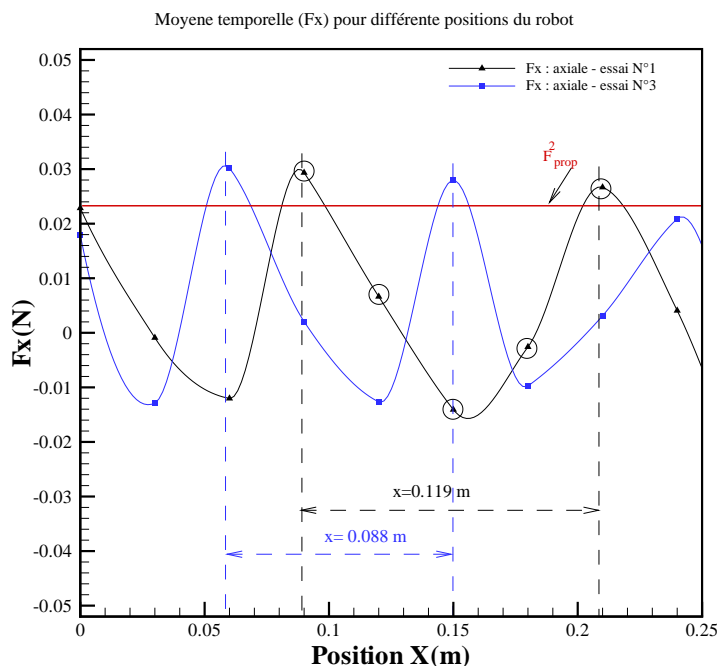


FIGURE 4.20 – Force axiale moyenne en fonction de la position du robot par rapport au vortex de l'écoulement externe. Les deux courbes (essais N °1 et 3) superposées sur le même graphe sont effectuées sous les mêmes conditions expérimentales, sauf que le temps de mesure (t_{mesure}) et le temps de initial (t_0) sont différents.

robot anguilliforme dans une allée de type BvK présente une nouveauté dans le domaine de recherche biomécanique de la nage en groupe. En effet, à notre connaissance, il nous semble que cette quantification expérimentale de l'augmentation de la force propulsive due aux interactions hydrodynamique n'avait pas été observée auparavant. Il en est de même pour l'étude paramétrique de la force en fonction du positionnement dans l'allée. En effet, nous avons constaté que lorsque les poissons nagent en formation de losange, le nageur placé dans l'allée BvK générée par les deux poissons amont, profite de l'écoulement tourbillonnaire. D'après nos résultats, il peut augmenter sa force de propulsion d'environ 20 à 30%, ce qui est en accord avec le travail de Wheis (1973) et récemment, les travaux de Candelier *et al.* (2012). Ce résultat s'applique pour ces deux conditions : la nage synchronisée des poissons et le choix d'une configuration de phase entre le poisson positionné en arrière et les poissons placés devant. Plus précisément, certaines configurations du poisson par rapport au fluide (i.e. position des vortex de l'allée BvK par rapport au corps) permettent de ponctionner de l'énergie à l'écoulement, tandis qu'inversement, d'autres configurations peuvent être destructives, c'est à dire coûter cher au poisson pour se propulser.

On peut donc légitimement se poser la question suivante : quelle est la configuration entre le poisson et les vortex de l'écoulement externe qui permet d'avoir des conditions optimales de

propulsion ? Pour répondre à cette question, il nous aurait fallu effectuer des mesures de champs de vitesses PIV simultanément aux mesures de forces afin d'identifier la position des vortex pour chaque valeur de force mesurée. Cependant, la réalisation de cette étude sur le robot n'ayant pas été possible (à cause de plusieurs contraintes expérimentales), une campagne expérimentale sur la nage d'une anguille naturelle dans le sillage du système à double aileron oscillant a donc été effectuée.

4.3.3 Nage d'une anguille dans une allée Benàrd von-Kàrmàn BvK inversée

Dans un premier temps, nous avons placé l'anguille dans le sillage du système d'oscillation, afin de la filmer et analyser sa nage dans l'allée BvK. Malheureusement, aucune nage n'a été observée dans ces conditions d'écoulement, l'anguille refusant de nager au centre de la veine d'essai. De manière assez inattendu, l'anguille semblait plutôt attirée par les ailerons dont le sillage correspond à un écoulement de type allée BvK inversé. Dans ce cas, nous avons alors observé, sur plusieurs séquences, une déformation de son corps assez particulière. La figure 4.21 présente deux photographies de l'anguille nageant dans le sillage d'un aileron, à deux instants différents. Cette allure est analysée et présentée dans ce qui suit.

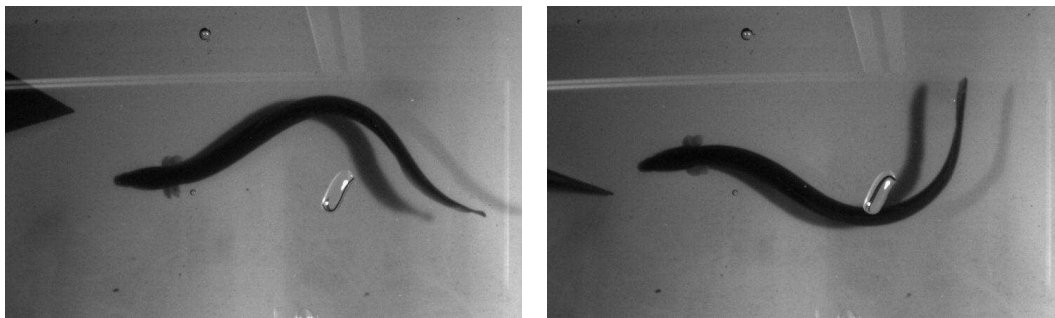


FIGURE 4.21 – Photographies de l'anguille nageant dans l'allée BvK inversée. Photographies correspondants à deux instants différents.

Allure de nage de l'anguille dans une allée BvK inversée

Pour analyser ce résultat, nous avons suivi la même procédure d'analyse que celle utilisée pour réaliser l'étude expérimentale du chapitre 2 de ce manuscrit (Étude et caractérisation de la nage d'une anguille réelle). Nous rappelons que la procédure expérimentale est composée de deux parties :

- Traitement d'images par squelettisation, afin d'obtenir les squelettes (ligne médiane) de l'anguille pour une période d'ondulation du corps.
- Identification des paramètres de la loi de déformation du corps (loi de nage).

Nous avons utilisé le modèle généralisé de la déformation du corps de l'anguille identifiée dans le chapitre 2, qui pour mémoire est donné par l'équation suivante :

$$y(s, t) = kA_m e^{\alpha(\frac{s}{L}-1)} \ln \left(\sin(|\beta^*|) + e^{\sin(\frac{2\pi}{\lambda}(s-Vt))} \right), \quad (4.3)$$

où K est une constante de signe, s est la coordonnée curviligne liée au corps de l'anguille, A_m l'amplitude du déplacement maximal de la queue, α le coefficient d'accroissement de l'amplitude, L la longueur du corps, λ la longueur d'onde, t le temps, V la vitesse de propagation de l'onde et β^* l'angle de nage par rapport à la direction de l'écoulement. La vitesse moyenne de nage est considérée équivalente en moyenne à la vitesse de l'écoulement incident U_∞ . Les squelettes de l'anguille pour une période de nage complète sont présentés sur la figure 4.22.

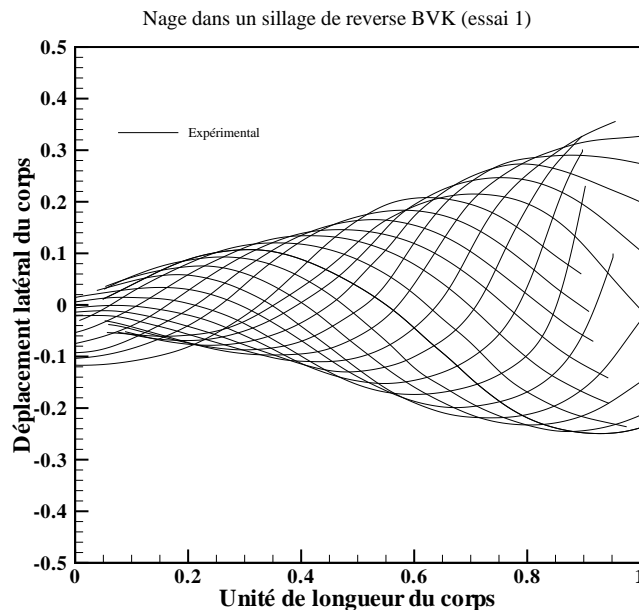


FIGURE 4.22 – *Squelettes de l'anguille superposés pour une période complète d'ondulation dans une allée BvK inversée ; résultat expérimental.*

Après analyse d'une séquence caractéristique, les paramètres de nage obtenus ont été référencés dans le tableau 4.2, où, pour comparaison nous faisons également figurer les résultats de Tytell (2004a) déjà présentés dans la section 2.3.1 du chapitre 2.

TABLE 4.2 – *Paramètres de la nage anguilliforme dans une allée BvK inversée (étude actuelle) et dans un écoulement uniforme (étude de référence Tytell 2004a).*

Type d'écoulement	U	V	A_m	β^*	λ	α	L
Résultat obtenu (BvK inversée)	0.8	1.45	0.32	0°	1.3	1.72	1
Tytell (2004a) (uniforme)	0.5	0.67	0.05	0°	0.67	3.9	1
	2	2.55	0.08	0°	0.67	2.25	1

V et U ($L s^{-1}$) ; A_m et λ (L)

On constate une différence significative entre les paramètres de nage dans un écoulement uniforme et celle dans une allée BvK inversée. Notamment, sur l'amplitude et la longueur d'onde du corps, qui augmente respectivement de 200% et de 120% environ. Il semble évident que, l'anguille ait adapté sa nage aux changements des conditions d'écoulement externe, ce qui va dans le même sens que les observations faites par Liao *et al.* (2003a) qui ont montré que lorsqu'une

truite est placée dans le sillage d'un cylindre (en forme D), dont l'écoulement est une allée BvK, son amplitude maximale du déplacement latéral de la queue et la longueur d'onde du corps augmentent respectivement de 130% et 110% par rapport à la nage dans un écoulement uniforme.

Mécanisme d'exploitation de vortex : analyse qualitative et approche théorique

Pour mieux comprendre le mécanisme d'exploitation des vortex, nous avons ensuite effectué une analyse qualitative de l'interaction dynamique entre l'anguille et l'écoulement, basée sur l'observation de la position relative du corps de l'anguille par rapport aux vortex de l'allée. Pour cela, nous avons superposé le corps de l'anguille (de la vidéo de nage) sur un cliché PIV de l'écoulement non-perturbé associé (en tenant compte du rapport d'échelle entre les deux images). La figure 4.23 présente une période complète de battement de la queue, présentant le corps de l'anguille dans l'allée BvK inversée. Cinq doubles images instantanées sont présentées (du haut vers le bas). Pour chaque instant, une image de la vidéo de nage a été superposée aux champs de vorticité de l'écoulement, mesuré indépendamment, et présenté dans la section 4.3.1.

D'après nos observations des résultats présentés sur la figure 4.23, nous constatons que :

- Lorsque l'anguille nage dans une allée BvK inversée, elle synchronise sa nage avec l'écoulement tourbillonnaire externe. La valeur de la fréquence de l'onde produite le long du corps, et qui est déduite à partir de la différence de temps entre le premier et le dernier cliché (0.867s), est égale à $\simeq 1.1$ Hz.
- La tête de l'anguille semble jouer un rôle important dans l'orientation du corps et la détection des vortex , comme souligné par Liao (2007). Sa tête bouge latéralement pour anticiper de la présence et de l'intensité des vortex générés sur le bord de fuite de l'aileron.
- L'anguille fait onduler son corps avec une amplitude importante qui atteint une valeur supérieure à la moitié de la largeur de l'allée ($b/2$). Ce mouvement lui permet de placer son corps en permanence à l'extérieur des deux vortex contrarotatifs ($+\Gamma, -\Gamma$). Elle semble faire "glisser" les vortex tout au long de son corps pour finalement les relâcher au voisinage de la queue, et ce toutes les demies-périodes d'ondulation. L'anguille ne nage donc pas au sein de l'allée BvK inversée mais slalome volontairement à l'extérieur des vortex.

A notre connaissance, cette allure particulière de nage ne semble pas avoir fait l'objet d'une quelconque description dans la littérature. En effet, les études sur la nage dans un écoulement tourbillonnaire se sont généralement limitées aux écoulements de type BvK. Liao *et al.* (2003b) ont observé que le poisson se maintenait dans l'allée (entre les deux vortex contrarotatifs) en effectuant deux mouvements : le mouvement de déplacement latéral du corps et le mouvement d'ondulation (voir figure 4.24 b). Par contre, dans notre cas, l'anguille qui bénéficie d'une morphologie particulière lui permettant d'effectuer des mouvements d'ondulations de grandes amplitudes (sur une grande partie du corps), slalome dans l'allée BvK inversée (voir figure 4.24 a).

D'après l'observation de la figure 4.24, présentant la nage de l'anguille dans l'allée BvK

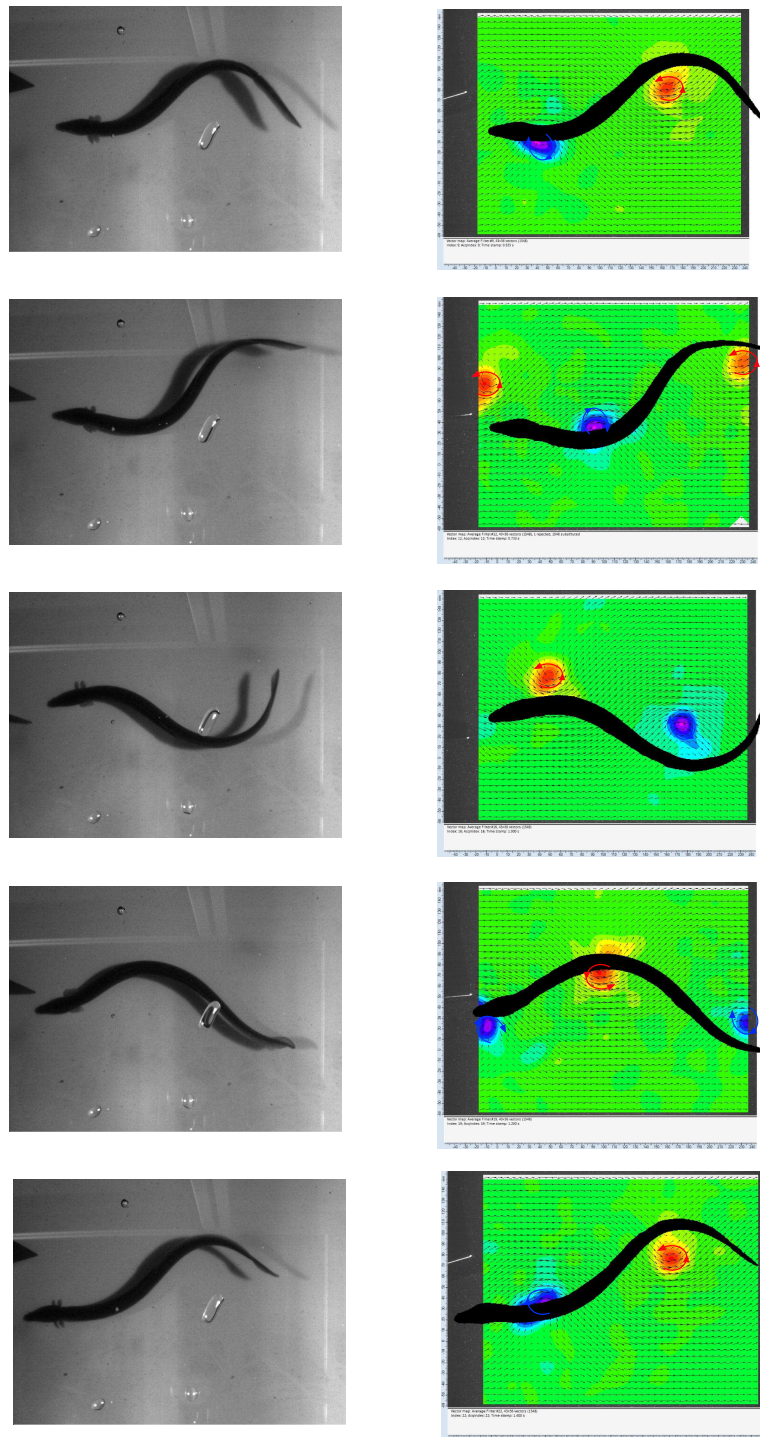


FIGURE 4.23 – À gauche, image de l'anguille dans le sillage d'un aileron. À droite, le corps de l'anguille superposé au champs de vorticité de l'écoulement non-perturbé associé (allée BvK inversée). De haut vers le bas, cinq clichés représentant une période d'ondulation.

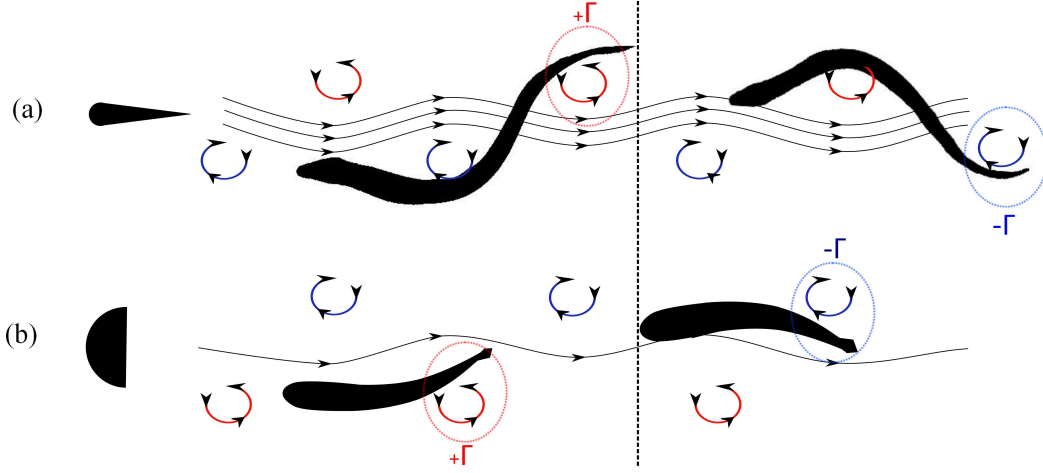


FIGURE 4.24 – Comparaison entre les mécanismes de nages suivants : une anguille dans une allée BvK inversée (a) et une truite dans une allée BvK (b) (voir Liao (2007)).

inversée et la truite dans l'allée BvK, nous remarquons que l'anguille et la truite nage en opposition de phase. Malgré cette différence, nous remarquons trois points communs concernant le mécanisme d'exploitation de l'énergie des vortex :

- La synchronisation en fréquence avec l'écoulement.
- Le sens de rotation du vortex relatif à la position du corps. Dans les deux cas, la position du corps est la même par rapport aux vortex de mêmes signes : au dessus si la circulation du vortex est positive et en dessous dans le cas contraire (voir figure 4.24 - cercles en pointillés rouge $+\Gamma$ et pointillés bleu $-\Gamma$).
- Pour une période d'ondulation, deux vortex contrarotatifs sont relâchés au voisinage de la queue.

On constate que même si les allures sont différents entre les nages dans les allées BvK et BvK inversée, le mécanisme d'exploitation de vortex est probablement le même.

Ces constatations peuvent être renforcées par une approche théorique basée sur un modèle de nage récemment publié par Candelier *et al.* (2012). Ces auteurs ont réalisé une étude théorique, basée sur le modèle de nage décrit par Lighthill "LAEBT", permettant de calculer la force hydrodynamique exercée par un écoulement arbitraire sur le corps d'un poisson lors de la nage. L'expression générale de la force obtenue se présente comme suit :

$$\vec{f}_h = \int_0^L \left(\underbrace{\rho A(X) \vec{\gamma}_f(r, t)}_{(i)} - \underbrace{P_r^\alpha \frac{\partial \vec{v}_f}{\partial X^\alpha}}_{(ii)} \bigg|_r - \underbrace{\frac{\partial \vec{p}_r}{\partial T}}_{(iii)} \right) dX + \underbrace{\left[U_r^1 \vec{p}_r - T_r \vec{t}_1 \right]_0^L}_{(iii)}, \quad (4.4)$$

Nous identifions la contribution de :

- (i) la force exercée par l'écoulement non perturbé
- (ii) la force exercée par la perturbation de l'écoulement (vortex)
- (iii) la force due aux termes instationnaires

(iv) la force due aux termes de bords (i.e. la caudale).

Nous nous sommes intéressés ici uniquement à la contribution des vortex (i.e. au terme (ii)) sur la force hydrodynamique exercée sur le corps du poisson. Pour simplifier davantage le problème, nous avons également fait les hypothèses suivantes (cf figure 4.25) :

- Le poisson est un tube cylindrique de courbure constante et de longueur L , et nous avons noté (\vec{t}_1, \vec{t}_2) le repère mobile lié au corps.
- Le poisson entoure de manière symétrique le vortex, dont la circulation est Γ (voir le schéma de la figure 4.25 sur lequel l'axe de symétrie est représenté par la ligne en pointillé rouge).
- La vitesse de l'écoulement en amont est U_∞ parallèle à l'axe \vec{e}_1 .
- Le corps ainsi que le centre du vortex sont fixes dans le plan (\vec{e}_1, \vec{e}_2) (aucun mouvement de translation).

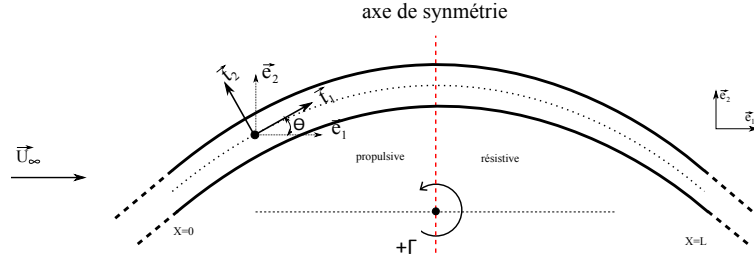


FIGURE 4.25 – Schéma représentatif du modèle théorique simplifié, permettant d'estimer la force hydrodynamique exercée par un vortex sur le corps d'un poisson à corps allongé.

En considérant uniquement le terme (ii) de l'équation 4.4, on peut alors écrire :

$$\vec{f}_h^{(ii)} \cdot \vec{e}_1 = \int_0^L P_f^2 \frac{\partial}{\partial Y} (\vec{v}_f \cdot \vec{e}_1) dX, \quad (4.5)$$

où P_f^2 est la composante suivant \vec{t}_2 du vecteur "impulsion" relatif au fluide. Notons bien qu'ici, le corps est immobile ce qui implique que $\vec{p}_r = -\vec{p}_f$ car $\vec{p}_b = 0$. De ce fait, dans ce cas de figure extrêmement simplifié, on peut remarquer que la force issue de ce terme est la somme de deux intégrales effectuées sur deux domaines coupés en $X = L/2$:

- Pour $0 < X < L/2$, l'angle θ est compris entre $\pi/2 < \theta < 0$. On a alors $P_f^2 < 0$, et si $\Gamma > 0$ on a de plus $\frac{\partial}{\partial Y} (\vec{v}_f \cdot \vec{e}_1) > 0$ de sorte que $\vec{f}_h^{(ii)} \cdot \vec{e}_1 < 0$, et du coup, cette partie est propulsive.
- Pour $L/2 < X < L$ l'angle θ est compris entre $0 < \theta < -\pi/2$. On a cette fois $P_f^2 > 0$ tandis que le terme $\frac{\partial}{\partial Y} (\vec{v}_f \cdot \vec{e}_1)$ reste > 0 , et par conséquent $\vec{f}_h^{(ii)} \cdot \vec{e}_1 > 0$. Cette partie étant donc orientée suivant \vec{e}_1 , elle est résistive.

D'après ce calcul, on constate alors que la contribution des vortex sur la force hydrodynamique est considérée, ici, nulle, du fait d'une compensation de part et d'autre du corps. A présent, lorsque le vortex se rapproche de la queue, il se trouve que la partie résistive de la force disparaît progressivement, ne laissant la place qu'à la partie propulsive, comme cela est illustré sur le

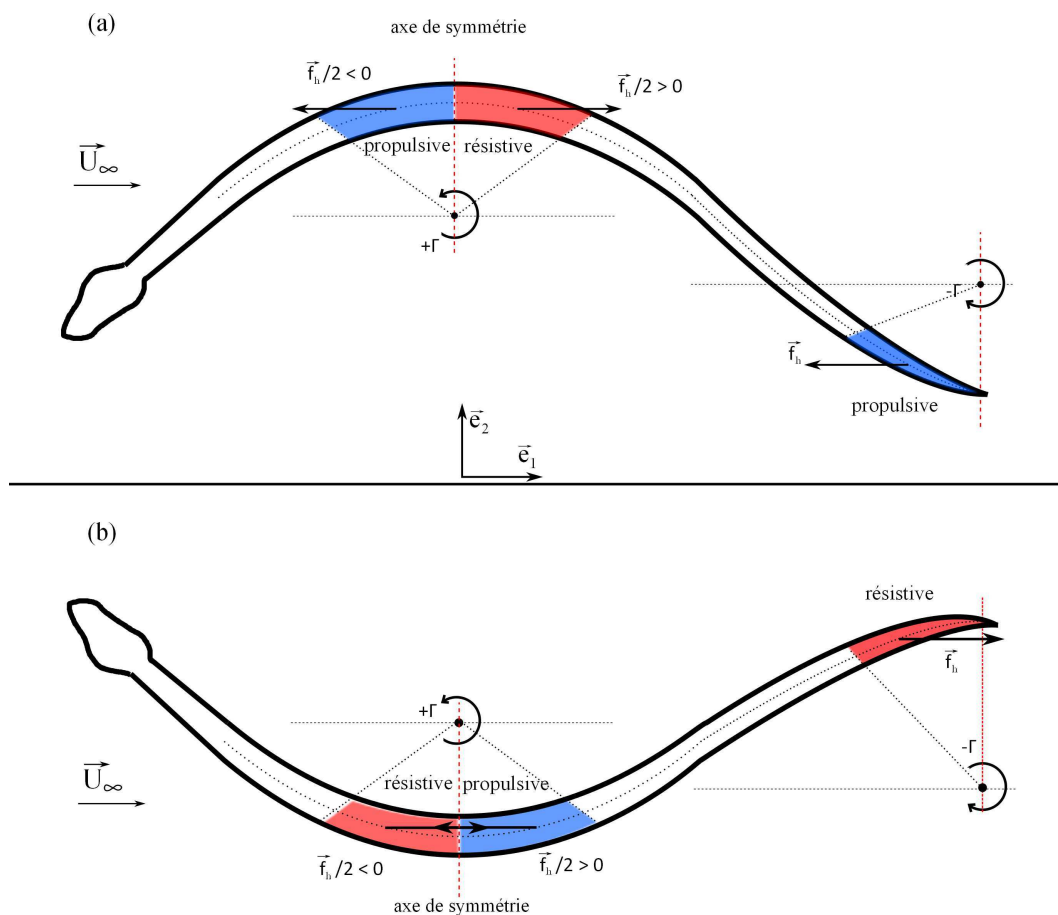


FIGURE 4.26 – Schéma représentatif d’une séquence de demi-période d’ondulation du corps d’un poisson à courbure constante (selon l’approche théorique) au voisinage d’un vortex en rotation positive (a) et négative (b).

schéma de la figure 4.26 (a). Ainsi, la résultante globale de ce processus se trouve être propulsive, et cela est dû au sens de la circulation du vortex. Inversement, si la vorticit   avait      contraire, la r  sultante globale du processus aurait      cette fois n  gative (comme cela est illustr   sur le sch  ma de la figure 4.26 b).

Ce ph  nom  ne semble donc expliquer la raison pour laquelle, dans une telle configuration, l’anguille s’  vertue    enrouler la vorticit   toujours dans le m  me sens, m  me si cela l’oblige    se contorsionner. Quoi qu’il en soit, cette   tude men  e sur les anguilles nous apporte des   l  ments de r  ponse    la question que nous nous sommes pos  e    la fin de la premi  re partie de ce chapitre. Apr  s avoir identifi   un m  canisme d’exploitation des vortex, nous pouvons imaginer une configuration du robot qui nous a conduit    une augmentation de la force de propulsion.

Chapitre 5

Modèle dynamique du module ANGELS

5.1 Introduction

Comme mentionné dans l'introduction générale de ce manuscrit, le robot ANGELS peut évoluer sous forme de deux configurations. Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude dédiée à la deuxième configuration de ce robot, c'est à dire à celle d'un module élémentaire propulsé par hélices (voir figure 5.1). Le but de cette étude est de fournir les données nécessaires pour l'établissement d'un modèle dynamique du module, à l'usage des automaticiens du projet pour la modélisation et la simulation rapide de boucles de commandes.



FIGURE 5.1 – Photographie du module ANGELS (gauche) et une vue CAO isométrique (droite).

Dans un premier temps, nous allons définir les caractéristiques cinématiques du module, c'est à dire, la géométrie, les repères et références, les vecteurs positions, vitesses et accélérations. Dans un deuxième temps, nous calculerons le modèle dynamique approprié à l'application décrite ci-dessus. Finalement, nous déterminons les paramètres de ce modèle via deux approches : expérimentale, pour identifier la trainée ainsi que les performances propulsives, et théorique pour évaluer les autres paramètres du modèle tels que l'inertie, les coriolis et les masses ajoutées.

5.2 Modèle cinématique

5.2.1 Caractéristiques du module ANGELS

Le module élémentaire du prototype ANGELS a été conçu par l'équipe Robotique de l'École Supérieure de Saint-Anna de Pise (SSSA) en Italie, partenaire du projet. La géométrie de base du prototype est considéré comme un cylindre de section elliptique elancée (figure 5.2). Il est équipé de trois propulseurs (à hélices), dont deux assurent son déplacement linéaire (placés parallèlement à son axe longitudinal) et un troisième assure sa rotation par rapport à son axe vertical (actionnement du lacet). Dans la suite de ce chapitre, "Prop 1" désignera le propulseur placé sur la partie supérieure du module et "Prop 2" désignera celui placé sur la partie inférieure. En ce qui concerne le troisième propulseur, nommé "Prop 3", il génère une force latérale permettant de contrôler le mouvement de rotation dans le plan de navigation xz .

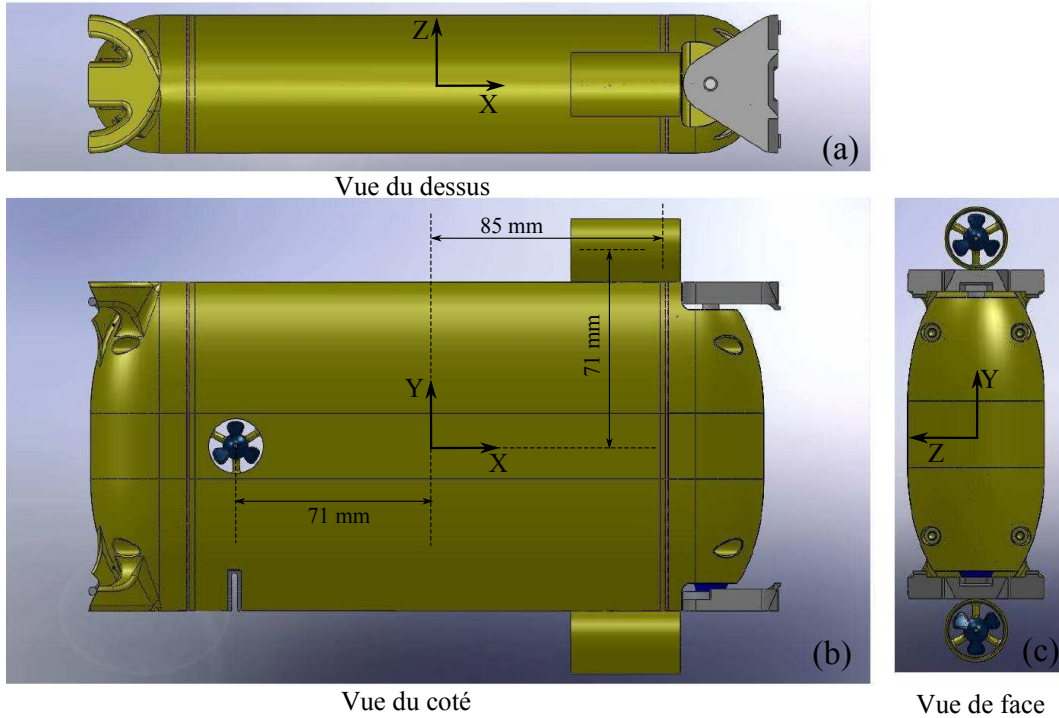


FIGURE 5.2 – Vues de dessus (a), de côté (b) et de face (c) du prototype Angels.

Aussi, un système basé sur le principe des ballastes de Sous-Marin est embarqué dans le module et contrôle, à l'aide d'un capteur de pression, la profondeur du module en faisant varier sa masse volumique. Via ce système, le prototype présente une flottabilité neutre. De plus, sa géométrie symétrique ainsi que son inertie quasi-symétrique, par rapport à son centre de gravité, lui confère une grande stabilité dynamique.

Les caractéristiques géométriques et inertielles du module sont référencées dans le tableau 5.1. Le centre géométrique O_G de la conception CAO représente le centre du repère de référence. Les axes longitudinales, verticales et perpendiculaires du module sont représentés respectivement par x , y et z .

Module AUV du robot ANGELS.			
Centre géométrique O_G	x (m)	y (m)	z (m)
Dimension	0.25	0.12	0.055
Centre de gravité O_g	-0.00154	-0.00958	0
Position Prop 1	0	0.085	0
Position Prop 2	0	-0.085	0
Position Prop 3	-0.071	0	0

Masse et Inertie	
$m_{AUV} = 1.275 \text{ Kg}$	$I_b = \begin{pmatrix} 0.156 & 0.00936 & 0.000269 \\ 0.00936 & 0.61 & 0.0000633 \\ 0.000269 & 0.0000633 & 0.725 \end{pmatrix} \text{ kgm}^2$

TABLE 5.1 – Caractéristiques géométriques du module ANGELS par rapport à son centre de géométrie O_G .

5.2.2 Repères et références

La modélisation cinématique du mouvement d'un corps solide nécessite la définition de deux repères orthonormaux : l'un fixe et l'autre mobile. La figure 5.3 représente un schéma du système cinématique, dont le repère fixe est noté W (O_w, x, y, z) (lié au laboratoire), et le repère mobile noté B (O_b, x_b, y_b, z_b) est lié au centre géométrique du module (O_G et O_b coïncident). Le module peut effectuer deux mouvements principaux : une translation suivant l'axe longitudinal x_b , exprimée par le vecteur \vec{b} dans le repère fixe, et une rotation d'angle θ_b suivant son axe vertical y_b . De ce fait, le module se déplace selon deux degrés de libertés par rapport au repère B (base mobile) et trois degrés de libertés par rapport au repère fixe W . Les vecteurs position et vitesse se présentent comme suit :

- $\chi = [x_b \ 0 \ 0 \ 0 \ \theta_b \ 0]^T$: vecteur de position et d'orientation exprimés dans le repère mobile B
- $\eta = [x \ 0 \ z \ 0 \ \theta \ 0]^T$: vecteur de position et d'orientation exprimés dans le repère fixe W , d'où $\theta = \theta_b$
- $v = [u \ 0 \ 0 \ 0 \ r \ 0]^T = [v_1 \ v_2]^T = [\dot{x}_b \ 0 \ 0 \ 0 \ \dot{\theta}_b \ 0]^T$: vecteur de vitesses linéaire et angulaire exprimé dans le repère mobile
- $\dot{\eta} = [\dot{x} \ 0 \ \dot{z} \ 0 \ \dot{\theta} \ 0]^T$: vecteur des vitesses linéaires et angulaires exprimé dans le repère fixe
- $\tau = [F_t \ 0 \ 0 \ 0 \ N \ 0]^T$: vecteur des force (F_t) et couple (N) externe appliqués sur le prototype exprimé dans le repère mobile

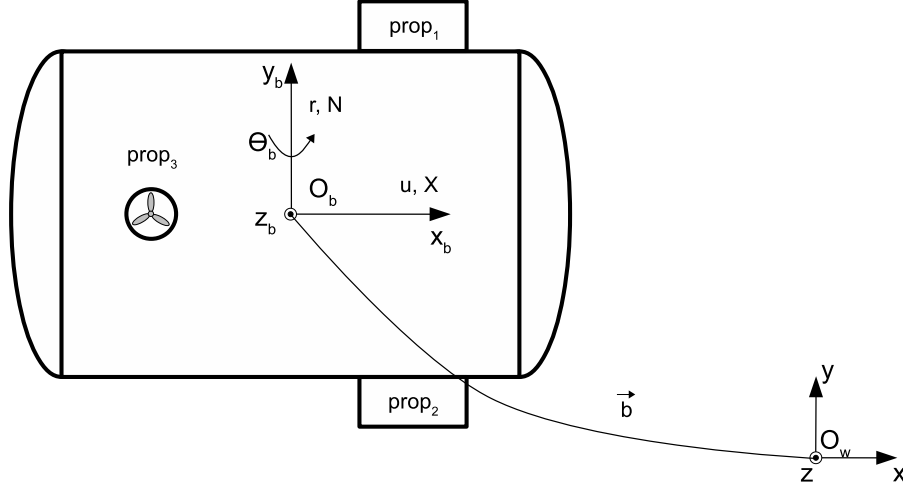


FIGURE 5.3 – Schéma représentatif des repères et références du module (AUV) du prototype ANGELS.

5.2.3 Matrice de transformation

Vecteur position

La position du robot peut être décrite par le même vecteur de position dans les deux repères, fixe et mobile (B et W). Cela ne nécessite pas une transformation de vecteur de position. Par contre, pour un point quelconque du module M_b exprimé dans le repère mobile, les coordonnées de ce point M_W dans le repère fixe sont obtenues par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} M_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_b \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

où b représente les coordonnées du vecteur de translation et R la matrice de rotation du module par rapport à θ_b , dérivant des fameuses angles d'Euler. Dans ce cas d'étude, seul l'angle θ_b est pris en compte. Il revient :

$$R = R_y(\theta) \quad , R = \begin{pmatrix} C\theta_b & 0 & S\theta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_b & 0 & C\theta_b \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Vecteurs vitesse et accélération

La transformation du vecteur vitesse de la base mobile vers la base fixe, se fait par l'équation suivante :

$$\dot{\eta} = \underline{J}(\eta)v \quad \underline{J}(\eta) = \begin{bmatrix} \underline{J}_1(\eta) & 0 \\ 0 & \underline{J}_2(\eta) \end{bmatrix}, \quad (5.3)$$

où les composantes de la matrice diagonale $\underline{J}(\eta)$ représentent la transformation de la vitesse linéaire ($\underline{J}_1(\eta)$) et angulaire ($\underline{J}_2(\eta)$). D'après Xu *et al.* (2008), $\underline{J}_1(\eta)$ et $\underline{J}_2(\eta)$ se présentent comme suit :

$$\underline{J}_1(\eta) = R = \begin{pmatrix} C\theta_b & 0 & S\theta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_b & 0 & C\theta_b \end{pmatrix} \quad \underline{J}_2(\eta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T\theta_b \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C\theta_b \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Notez bien que la matrice $\underline{J}_2(\eta)$ n'est pas définie pour $\theta_b = \pm\frac{\pi}{2}$. Nous considérons que l'angle de déviation du robot pendant son déplacement n'atteindra jamais une valeur proche de $\pm\frac{\pi}{2}$. Pour cette raison, nous avons choisi la représentation en fonction des angles d'Euler.

Après avoir identifié la cinématique du module, nous présentons dans la section suivante le modèle dynamique approprié ainsi que ses différents paramètres.

5.3 Modèle dynamique d'un corps solide-rigide

Dans la littérature, les plupart des modèles dynamiques appliqués à des véhicules sous marins autonomes, dérivent des équations de mouvement d'un corps solide-rigide dans un milieu fluide (voir par exemple Xu *et al.* 2008, Wang et Clark 2006, Albagul et Wahyudi 2004, Lin et al. 2009, Xichuan *et al.* 2009 et Wang *et al.* 2011).

Pour cette étude, nous avons choisi le modèle dynamique non-linéaire décrit par M Thor I. Fossen dans son livre "*Guidance and Control of Ocean Vehicles*" (Fossen 1994), qui se présente comme suit :

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(v) = \tau \quad (5.5)$$

d'où :

M - matrice d'inertie totale du système (incluant les masses ajoutées)

$C(v)$ - matrice des forces centrifuges et de coriolis (incluant les masses ajoutées)

$D(v)$ - matrice des forces de frottements visqueux

$g(v)$ - vecteur des forces et moments de gravité

τ - vecteur des forces externes (généralement les entrées de la commande)

La matrice d'inertie M du modèle est égale à la somme de la matrice d'inertie du corps (M_b) et l'inertie des masses ajoutées par le fluide (M_{fluide}), de même, pour la matrice coriolis $C = C_b + C_{fluide}$. Les forces totales de frottements entre le corps et le fluide sont présentées par la matrice D . En négligeant les force de gravité de notre système, le vecteur $g(v)$ est considéré comme nul.

Pour identifier les termes de l'équation 5.5, nous avons procédé de la manière suivante. Premièrement, nous avons calculé les deux premiers termes (M et $C(v)$) en suivant une approche lagrangienne du déplacement d'un corps solide rigide dans un fluide parfait (voir Fossen (1994)).

Ensuite, nous avons identifié les composantes de la matrice des effets visqueux ($D(v)$), en réalisant une étude expérimentale de mesure de force. Enfin, concernant le vecteur τ , nous avons caractérisé les performances propulsives du propulseur et nous avons fourni une corrélation de la force en fonction des entrées de la commande. Notons que les unités de calcul utilisées dans la suite de ce chapitre sont des kilogrammes (kg), des mètres (m) et des Newton (N).

5.3.1 Calculs des matrices d'inertie et de coriolis

Pour calculer les matrices d'inertie et des effets coriolis, Fossen (1994) a utilisé la description vectorielle proposée par Kirchhoff décrivant le mouvement d'un corps solide rigide dans un fluide parfait. Kirchhoff se base, dans sa présentation vectorielle du mouvement, sur l'énergie cinétique T du corps.

Équations de mouvements décrite par Kirchhoff

Considérons un corps solide-rigide en mouvement dans un fluide parfait. On représente la vitesse linéaire et angulaire attaché au repère mobile (lié au corps) respectivement par v_1 et v_2 . D'après Kirchhoff, suite au déplacement du corps, il existe une relation entre la force τ_1 et le moment τ_2 externes d'une part et l'énergie cinétique d'autre part, d'où :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dv_1} \right) + v_2 \times \frac{dT}{dv_1} = \tau_1, \quad (5.6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{dv_2} \right) + v_2 \times \frac{dT}{dv_2} + v_1 \times \frac{dT}{dv_1} = \tau_2. \quad (5.7)$$

Soit M la matrice d'inertie de dimension $[6 \times 6]$ du corps :

$$M_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad M_{ij} \equiv [3 \times 3], \quad (5.8)$$

L'énergie cinétique T s'écrit sous la forme quadratique suivante :

$$T = \frac{1}{2} v^T A v = \frac{1}{2} (v_1^T M_{11} v_1 + v_1^T M_{12} v_2 + v_2^T M_{21} v_1 + v_2^T M_{22} v_2). \quad (5.9)$$

En dérivant 5.9 par rapport à la vitesse linéaire v_1 et angulaire v_2 , on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dv_1} &= M_{11} v_1 + M_{12} v_2, \\ \frac{dT}{dv_2} &= M_{21} v_1 + M_{22} v_2. \end{aligned} \quad (5.10)$$

En remplaçant 5.10 dans les équations 5.6 et 5.7, on obtient :

$$\frac{d}{dt} (M_{11} v_1 + M_{12} v_2) + v_2 \times (M_{11} v_1 + M_{12} v_2) = \tau_1, \quad (5.11)$$

$$\frac{d}{dt} (M_{21} v_1 + M_{22} v_2) + v_2 \times (M_{21} v_1 + M_{22} v_2) + v_1 \times (M_{11} v_1 + M_{12} v_2) = \tau_2. \quad (5.12)$$

Maintenant, en représentant les équations 5.11 et 5.12 sous forme matricielle, on obtient :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}}_{(inertie)} \begin{bmatrix} \dot{v}_1 \\ \dot{v}_2 \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0_{[3 \times 3]} & -S(\frac{dT}{dv_1}) \\ -S(\frac{dT}{dv_1}) & -S(\frac{dT}{dv_2}) \end{bmatrix}}_{(coriolis)} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}, \quad (5.13)$$

où S est la matrice antisymétrique. La forme obtenue par l'équation 5.13 correspond bien au modèle dynamique présenté dans l'équation 5.5, exception faite pour les effets visqueux.

Nous allons maintenant calculer les matrices inertielle et coriolis de l'équation 5.13. Notons que le calcul complet de ces matrices est décrit dans Fossen (1994).

Inertie et masses ajoutées

La matrice d'inertie du modèle est composée de la matrice d'inertie liée au module ANGELS et la matrice des masses ajoutées par le fluide.

$$M_{[6 \times 6]} = M_b + M_{fluide} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

La matrice d'inertie M_b s'écrit de la façon suivante :

$$M_b = \begin{bmatrix} mI_{[3 \times 3]} & mS(r_G) \\ -mS(r_G) & I_b \end{bmatrix}, \quad (5.15)$$

d'où

$$S(r_G) = \begin{pmatrix} 0 & z_G & -y_G \\ -z_G & 0 & -x_G \\ y_G & x_G & 0 \end{pmatrix},$$

où m est la masse totale du module, I_b est le tenseur d'inertie du module (voir tableau 5.1), $r_G = \overrightarrow{O_G O_g}$ est le vecteur position du centre de gravité du module exprimé dans le repère mobile et la matrice S est une matrice antisymétrique. En remplaçant chaque élément de la matrice 5.15, on obtient :

$$M_b = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & -mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{bxx} & I_{bxy} & I_{bxz} \\ mz_G & 0 & mx_G & I_{byx} & I_{byy} & I_{byz} \\ -my_G & -mx_G & 0 & I_{bzx} & I_{bzy} & I_{bzz} \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

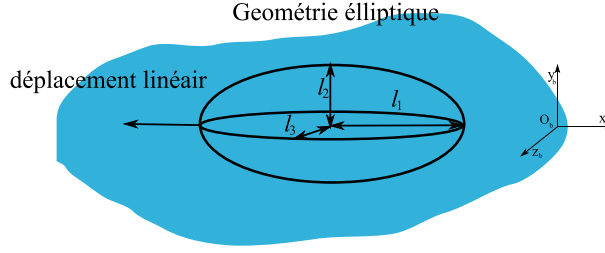


FIGURE 5.4 – Schéma représentatif du modèle elliptique choisi pour le calcul de la matrice des masses ajoutées par le fluide.

Les effets de masses ajoutées sur un corps immergé en mouvement, dépendent fortement de sa géométrie. Afin de les identifier, nous avons utilisée une approche théorique développée par Lamb (1932) et référencée par Leonard (1997). Celle-ci concerne l'étude du mouvement d'une ellipsoïde dans un fluide parfait.

Considérons un solide d'une forme ellipsoïdale dont les demi-axes l_1 , l_2 et l_3 présentés sur la figure 5.4 correspondent aux dimensions du module ANGELS (voir le tableau 5.1). De ce fait, la géométrie du modèle est symétrique par rapport aux trois plans $x_b - y_b$, $y_b - z_b$ et $z_b - x_b$, ce qui nous permet de considérer que la matrice de masses ajoutées par le fluide est une matrice symétrique. Soit :

$$M_{fluide} = diag(\overline{A}, \overline{B}, \overline{C}, \overline{P}, \overline{Q}, \overline{R}). \quad (5.17)$$

D'après Leonard (1997), les composantes diagonales de la matrice M_f sont définies par :

$$\overline{A} = \frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} \rho_0 V \quad \overline{B} = \frac{\beta_0}{2-\beta_0} \rho_0 V \quad \overline{C} = \frac{\gamma_0}{2-\gamma_0} \rho_0 V,$$

$$\overline{P} = \frac{1}{5} \frac{(l_2^2 - l_3^2)^2 (\gamma_0 - \beta_0)}{2(l_2^2 - l_3^2) + (l_2^2 + l_3^2)(\beta_0 - \gamma_0)} \rho_0 V,$$

$$\overline{Q} = \frac{1}{5} \frac{(l_3^2 - l_1^2)^2 (\alpha_0 - \gamma_0)}{2(l_3^2 - l_1^2) + (l_3^2 + l_1^2)(\gamma_0 - \alpha_0)} \rho_0 V,$$

$$\overline{R} = \frac{1}{5} \frac{(l_1^2 - l_2^2)^2 (\beta_0 - \alpha_0)}{2(l_1^2 - l_2^2) + (l_1^2 + l_2^2)(\alpha_0 - \beta_0)} \rho_0 V,$$

où $V = \frac{4}{3}\pi l_1 l_2 l_3$ est le volume du modèle, ρ_0 est la densité du fluide (densité de l'eau) et $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ se définissent par :

$$\alpha_0 = l_1 l_2 l_3 \int_0^\infty \frac{d\lambda}{(l_1^2 + \lambda)\delta}, \quad \beta_0 = l_1 l_2 l_3 \int_0^\infty \frac{d\lambda}{(l_2^2 + \lambda)\delta}, \quad \gamma_0 = l_1 l_2 l_3 \int_0^\infty \frac{d\lambda}{(l_3^2 + \lambda)\delta}$$

$$\delta = \sqrt{(l_1^2 + \lambda)(l_2^2 + \lambda)(l_3^2 + \lambda)}.$$

Le calcul des composantes de la matrice M_{fluide} a été effectué numériquement via Matlab et les valeurs numériques sont rapportées dans l'annexe D. Finalement, la matrice d'inertie totale est égale à la somme des deux matrices 5.16 et 5.17. Il revient :

$$M = \begin{bmatrix} m + \overline{A} & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m + \overline{B} & 0 & -mz_G & 0 & -mx_G \\ 0 & 0 & m + \overline{C} & my_G & mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{bxx} + \overline{P} & I_{bxy} & I_{bxz} \\ mz_G & 0 & mx_G & I_{byx} & I_{byy} + \overline{Q} & I_{byz} \\ -my_G & -mx_G & 0 & I_{bzx} & I_{bzy} & I_{bzz} + \overline{R} \end{bmatrix}. \quad (5.18)$$

Forces de Coriolis et effets centrifuges

Nous avons présenté dans l'équation 5.13 la matrice des forces coriolis de la forme suivante :

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0_{[3 \times 3]} & -S(\frac{dT}{dv_1}) \\ -S(\frac{dT}{dv_1}) & -S(\frac{dT}{dv_2}) \end{bmatrix}. \quad (5.19)$$

En remplaçant (5.10) dans (5.19), on obtient :

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0_{[3 \times 3]} & -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ -S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & -S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix}. \quad (5.20)$$

Dans ce cas, elle est égale à la somme des deux matrices $C_b(v)$ liée à l'inertie du module M_b et $C_{fluide}(v)$ liée aux masses ajoutées par le fluide M_{fluide} . D'après Fossen (1994) Elles se présentent comme suit :

$$C_b(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & my_{Gr} & -mx_{Gr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -mu & my_{Gr} \\ -my_{Gr} & 0 & 0 & 0 & -I_{yz}r & -I_{yy}r \\ mx_{Gr} & 0 & mu & I_{yz}r & 0 & -I_{xy}r \\ 0 & -mu & -my_{Gr} & I_{yy}r & I_{xy}r & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.21)$$

$$C_{fluide}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\bar{A}u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{A}u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{Q}r \\ 0 & 0 & -\bar{A}u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{A}u & 0 & -\bar{Q}r & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.22)$$

Les valeurs numériques sont calculées et rapportées dans l'annexe D.

Coefficients hydrodynamiques

Lorsque un fluide visqueux entre en contact avec un corps solide, une couche limite se développe dans laquelle le fluide est cisailé. Ce phénomène aura pour effet de générer des forces de frottement appliquées par le fluide sur le solide. Pour des géométries particulières comme un cylindre, une plaque ou une sphère, il existe des approches théoriques permettant de déterminer le coefficient de frottement visqueux. Cependant, plus la géométrie est complexe, plus la modélisation de la force de traînée le sera. Pour le cas du module ANGELS, nous avons choisi d'effectuer une étude expérimentale afin de mesurer les forces de traînées appliquées sur le module pour différentes vitesses de l'écoulement.

La matrice de forces hydrodynamiques $D(v)$ est composée de deux composantes, selon les deux degrés de libertés (traînée linéaire et angulaire). Elle se présente sous la forme suivante :

$$D(v) = \begin{bmatrix} F_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.23)$$

$$F_D = \frac{1}{2}C_D S_x u^2,$$

$$M_D = \frac{1}{2}C_M S_x r^2,$$

où F_D et M_D représentent respectivement les trainées linéaire et angulaire. Comme nous ne possédons pas les moyens expérimentales pour déterminer la trainée angulaire et étant donnée que le module a une dynamique de lacet lente, la trainée angulaire a été négligée du modèle des efforts visqueux.

Le vecteur τ représente l'ensemble des forces et moments de forces extérieures appliqués sur le module. Prop1 et Prop2 génèrent une force axiale suivant l'axe des x et Prop3 crée un couple autour de l'axe vertical y . τ représente la matrice d'entrée pour la commande, elle dépend des tensions appliquées aux propulseurs désignées par U (volts) et s'exprime comme suit :

$$\tau = [F_t \ 0 \ 0 \ 0 \ N \ 0]^T, \quad (5.24)$$

5.4 Étude expérimentale

Cette section présente l'étude expérimentale mise en place pour effectuer les mesures de forces hydrodynamiques, concernant la force de trainée linéaire F_D et la performance propulsive du propulseur à hélice.

5.4.1 Matériels et méthodes

Le dispositif expérimental mis en place pour cette étude est présenté sur la figure 5.5. Il est composé d'un système de mesure de forces installé sur le banc hydrodynamique (cf. section 1.1). Il comprend un capteur de force multi-axes, une chaîne d'acquisition "National Instruments" et un programme d'enregistrement développé sous le logiciel LABVIEW. Le capteur est installé sur un support placé sur la partie supérieure du banc, dont nous pouvons régler sa position en largeur et hauteur. Les dimensions du banc d'essai permettent d'avoir une grande section de travail : 60 centimètres de largeur, 45 centimètres de hauteur et 150 centimètres de longueur. De ce fait, nous avons positionné le capteur dans le plan médian pour éviter les effets de bords. L'objet d'étude est placé à une hauteur moyenne où le profil de l'écoulement est presque homogène.

Les mesures sont effectuées sur deux objets (voir figure 5.5) : le prototype ANGELS (pour mesurer la force de trainée hydrodynamique) et le propulseur (pour caractériser ses performances propulsives).

5.4.2 Force de trainée

Afin de déterminer la trainée du module, les forces axiales ont été mesurées dans le banc hydrodynamique en faisant varier la vitesse de l'écoulement. Le module est fixé sur un capteur à l'aide d'une tige d'adaptation (voir figure 5.5). Un réglage de position complémentaire (en position angulaire d'une précision de $\pm 0.01^\circ$) est associé à la tige afin d'assurer le bon alignement par rapport à la direction de l'écoulement. Le module est immergé à mi-profondeur de la section d'étude du banc d'essai.

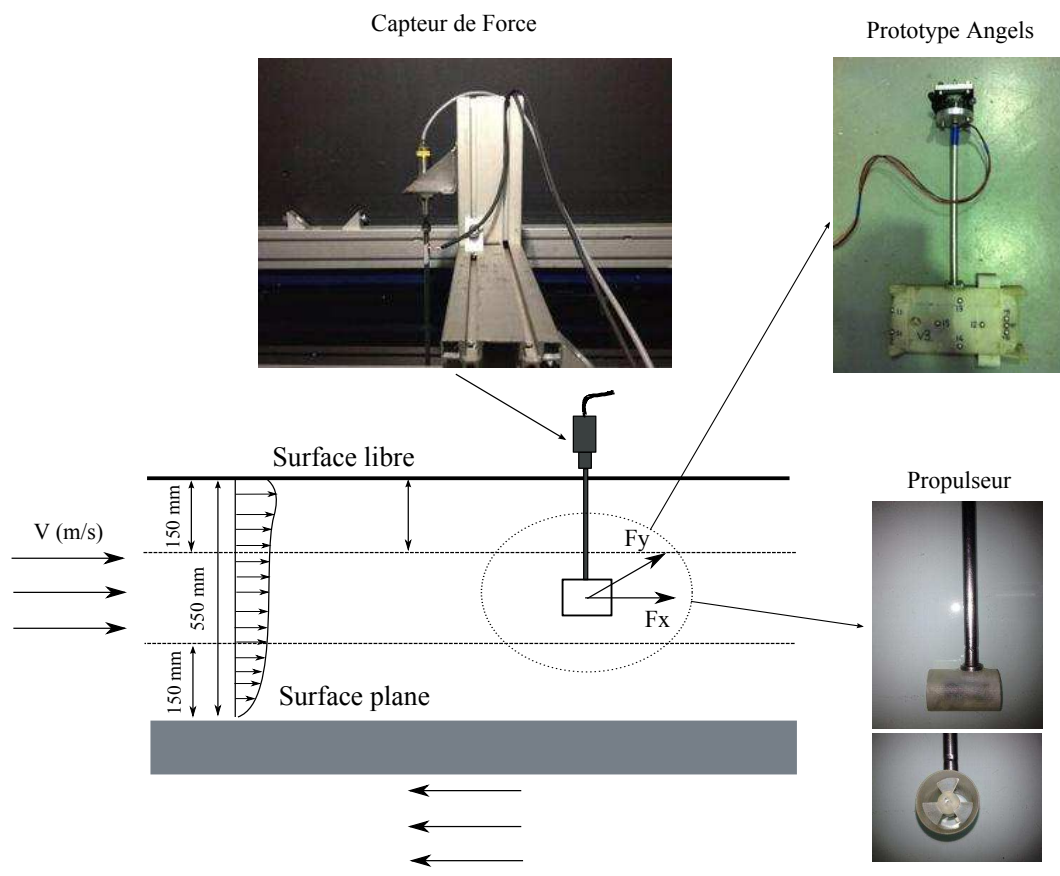


FIGURE 5.5 – Schéma représentant le dispositif expérimental

La force de traînée mesurée par le capteur est égale à la somme des forces exercées sur le module et sur la tige. De ce fait, la traînée de la tige (de section cylindrique) est prise en compte, afin de la substituer des valeurs de forces mesurées.

La tige est un cylindre circulaire de diamètre $D_{tige} = 0.012$ m, dont l'axe de révolution est placé perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Pour une longueur $L_{tige} = 0.18$ m (longueur de la surface du cylindre exposée au fluide) on peut exprimer la traînée comme suit :

$$F_{tige}^d = \frac{1}{2} C_{tige} \rho D_{tige} L_{tige} V^2, \quad (5.25)$$

où ρ est la densité du fluide, V est la vitesse longitudinale de l'écoulement et C_{tige} le coefficient de traînée du cylindre. C_{tige} dépend du régime de l'écoulement, autrement dit, le nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{V D_{tige}}{\nu}, \quad (5.26)$$

où ν est à la viscosité cinématique de l'écoulement.

Les mesures de forces sont effectuées pour des vitesses d'écoulement V qui varie entre 0.03 m/s et 0.46 m/s avec un pas de $\Delta V = 0.03$ m/s. Dans ces conditions, le nombre de Reynolds (suivant le diamètre de la tige) varie entre 360 et 5520. Pour un cylindre de section circulaire dont l'axe est perpendiculaire à la direction d'un écoulement à nombre de Reynolds équivalent à 10^3 , le coefficient de traînée, ici C_{tige} , ne varie plus et reste proche de 1.2 et ceci jusqu'à $Re = 2 \cdot 10^5$.

Nous avons calculé la force de traînée appliquée sur la tige F_{tige} dans ces conditions et nous avons rapporté ces résultats sur la figure 5.6 (symbole \triangleright). Sur la même figure, nous avons présenté par le symbole (*) les forces de traînée exercées sur le système tige/module ($F_{système}$) mesurées par le capteur. Pour obtenir les valeurs des traînées appliquées sur le module ANGELS isolé (F_D), nous avons soustrait F_{tige} de $F_{système}$. F_D est représenté également sur la figure 5.6 par le symbole (\times).

D'après la figure 5.6, nous remarquons que le terme quadratique de la corrélation entre la force de traînée et la vitesse de l'écoulement présente une influence remarquable sur la courbe des forces (symbole \times) par rapport au terme linéaire. Cette corrélation s'exprime comme suit :

$$F_D = C_V V + C_{V|V} V|V|, \quad (5.27)$$

$$C_{V|V} = 2.903.$$

Pour identifier les régimes de l'écoulement où le module évoluera lors de son utilisation, nous avons observé l'évolution du coefficient adimensionnel de la traînée C_D en fonction du nombre de Reynolds.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho S V^2}, \quad (5.28)$$

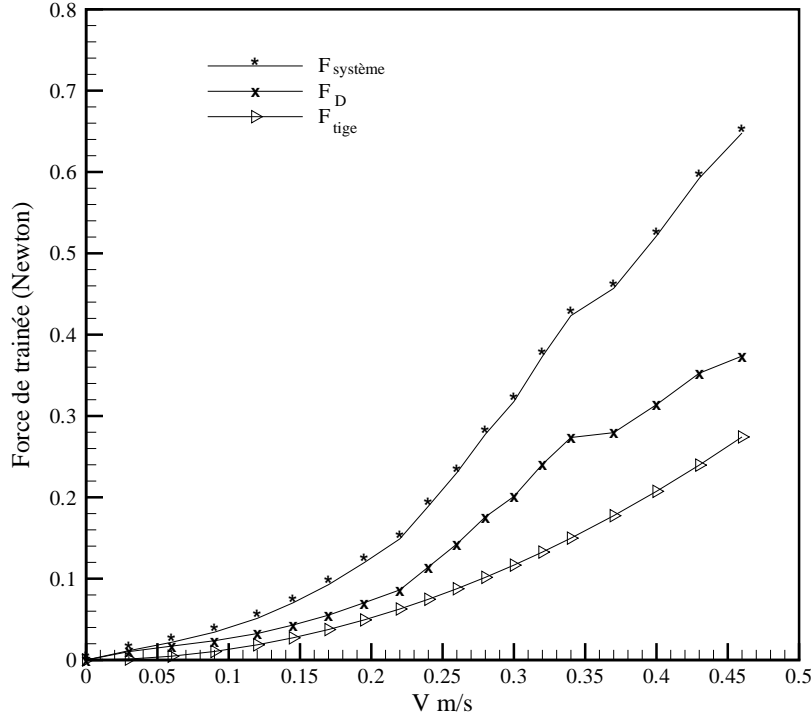


FIGURE 5.6 – Forces de trainée en fonction de la vitesse de l'écoulement.

où $S = 0.0127 \text{ m}^2$ représente la surface frontale du module exposée à l'écoulement dans l'axe longitudinal du module (axe des x). C_D est représenté dans la figure 5.7 en fonction du nombre de Reynolds, où la longueur caractéristique correspond ici à la longueur du module L (suivant l'axe longitudinal x), référencée dans le tableau 5.1.

Nous remarquons que pour un nombre de Re variant entre $7 \cdot 10^3$ et $2 \cdot 10^4$ ($0.03 \text{ m/s} < V < 0.1 \text{ m/s}$), le coefficient de trainée C_D chute rapidement de 2 à 0.5. Ensuite, il se stabilise autour de 0.3 jusqu'à que le nombre de Reynolds atteigne une valeur de $5 \cdot 10^4$. Au delà de ce nombre (pour $V > 0.23 \text{ m/s}$), le coefficient de trainée varie brusquement. Cela se traduit par un changement de régime de l'écoulement en aval du module (crise de résistance). Nous nous sommes pas intéressés à ce régime d'écoulement, car d'une manière pratique la vitesse maximale du module est de $u = 0.2 \text{ m/s}$. De ce fait, dans notre cas, nous considérons que C_D varie linéairement en fonction du nombre de Reynolds, et sa valeur, pour les conditions probables d'utilisation ($u \leq 0.2 \text{ m/s}$), varie entre 0.25 et 0.3.

Pour la partie commande, nous allons utiliser la corrélation de la force de trainée en fonction de la vitesse de l'écoulement, présentée dans l'équation 5.27. Pour intégrer cette corrélation dans le modèle dynamique, nous allons remplacer la vitesse de l'écoulement V par la vitesse linéaire

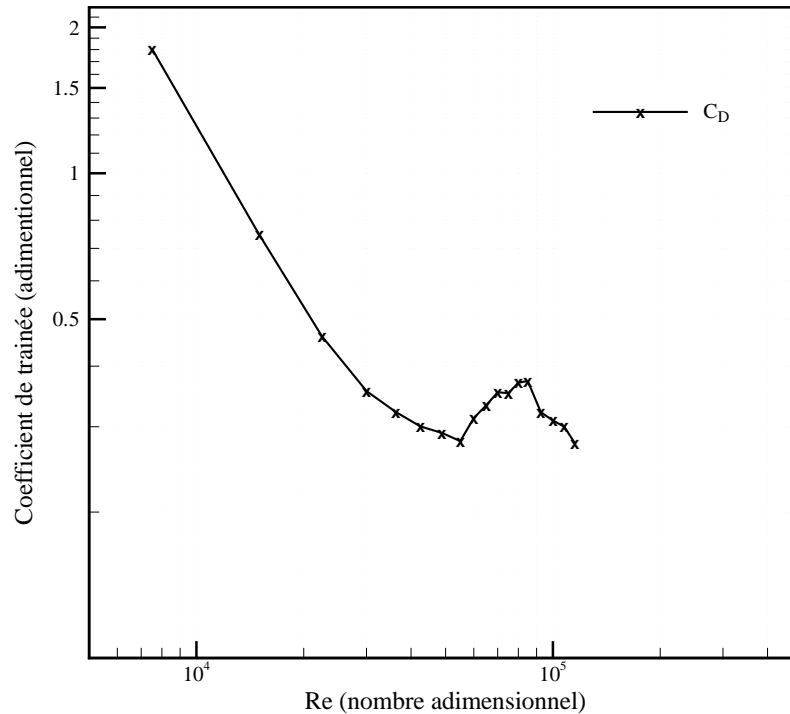


FIGURE 5.7 – Coefficient adimensionnel de la trainée axiale appliquée sur le module.

du module u :

$$F_D = 0.1408u + 2.903u|u|. \quad (5.29)$$

5.4.3 Forces de propulsion

Comme mentionné en début de ce chapitre, le module est équipé de trois propulseurs à hélice (Prop1, Prop2 et Prop3) identiques et composés de trois parties principales (voir figure 5.8) :

- un moteur à courant continu (DC)
- système de couplage magnétique entre l'hélice et le moteur
- hélice de propulsion à trois pales

Caractéristiques électromécaniques du propulseur

Le moteur (DC) est alimenté par une tension U continue et comprise entre 0.1 et 1.5 volts. L'hélice est connectée au rotor par un système magnétique, dont le couple magnétique τ_m varie en fonction du courant I . Un schéma du système électromécanique est présenté dans la figure 5.9.

Le système d'équation (5.30), fourni par notre partenaire du projet (concepteur du propulseur),

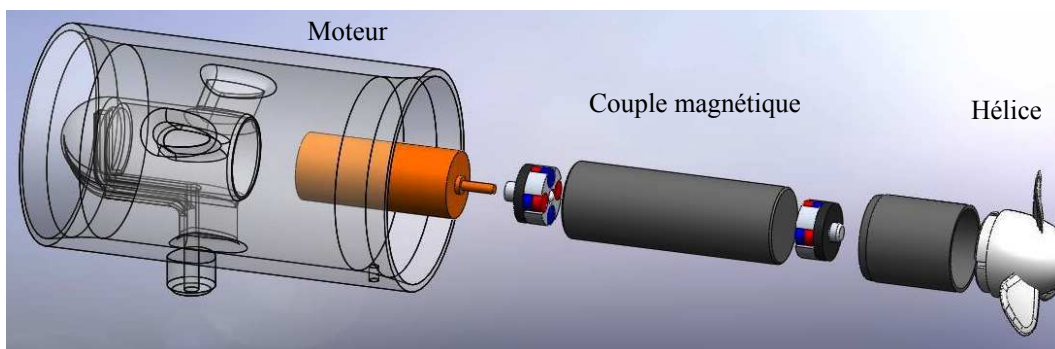


FIGURE 5.8 – Les composantes du système de propulsion.

décrit respectivement : la tension totale du circuit, le nombre de tour, le couple magnétique et la contrainte de frottement interne (statique et visqueux). Les constantes de l'équation 5.30 sont référencées dans le tableau 5.2.

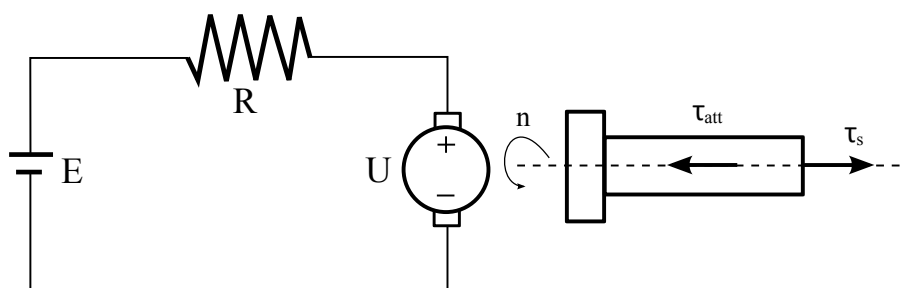


FIGURE 5.9 – Schéma du système électromécanique du propulseur.

$$E = RI + U,$$

$$n = K_n U, \quad (5.30)$$

$$\tau_m = K_\tau I,$$

$$\tau_{att} = \tau_s + c_n n /$$

Plan d'expériences et résultat

Dans un premier temps, nous avons effectué une étude comparative de l'efficacité propulsive de quatre hélices, de conception différente. Cette différence concerne les surfaces d'ouvertures

Caractéristique	Symbole	Valeur expérimental
Résistance	R	3.61Ω
Constante de rotation	K_n	9000 tr/min
Constante de couple	K_τ	1.04 Nmm/A
Frottements statiques	τ_s	0.009 Nmm
Coefficient de frottement visqueux	c_n	10^{-6} Nmm/tr/min

TABLE 5.2 – *Caractéristiques électromécaniques du système de propulsion.*

entre les pâles. Les mesures sont effectuées en régime statique. Plus précisément, le propulseur se trouve dans un fluide au repos et seul la tension de contrôle U varie. Ces mesures ont pour objectif de valider le choix d'une hélice, avant d'entamer la deuxième partie de l'étude.

Dans un deuxième temps, nous avons mesuré les forces de propulsions en régime dynamique, c'est à dire, en faisant varier la vitesse de l'écoulement V dans le banc d'essai. Nous avons choisi d'étudier l'évolution de la force de traînée en régime dynamique, afin d'identifier la corrélation de la force en fonction de la vitesse du module u (ce qui correspond à la vitesse de l'écoulement V lorsque le module est fixé sur le capteur) et la tension de contrôle U .

Pour une tension de contrôle U (variant entre 0.3 et 1.5 V) et une fréquence d'acquisition de 1000 Hz, un échantillon de 20000 valeurs de forces est enregistré. Ensuite nous mesurons la force moyenne F_t^{prop} pour différente valeur de U . La figure 5.10 présente les forces de propulsions des quatre hélices mesurées en fonction de U . La force de propulsion de l'hélice numéro trois (hélice 3) en régime statique est la plus importante des quatre et atteint un maximum de 0.057 N. De ce fait, l'hélice 3 est choisie pour la caractérisation dynamique de la force de propulsion. Les mesures (en utilisant cette fois l'hélice 3) en régime dynamique sont effectuées en variant la vitesse de l'écoulement V de 0.06 à 0.23 m/s. Pour chaque valeur de vitesse, une série de mesure de force est réalisée en variant la tension de commande U . Les résultats sont présentés sur la figure 5.11.

Pour $U = 0$ volt, la force F_t^{prop} mesurée, diminue en fonction de la vitesse de l'écoulement V . Ces valeurs correspondent aux forces de traînées axiales du systèmes (propulseur plus tige). Comme nous sommes intéressés par la force nette de propulsion, nous soustrairons de la force mesurée par le capteur, la force de traînée enregistrée pour $U = 0$. La figure 5.12 présente la force nette de propulsion de l'hélice 3 en fonction de la tension U pour différentes valeurs de vitesses d'écoulement.

D'après la figure 5.12, nous remarquons que la force de propulsion diminue en fonction de la vitesse d'écoulement. Autrement dit, lorsque la vitesse du module augmente, la vitesse du fluide traversant le propulseur augmente et la force de propulsion diminue. On déduit que la force de propulsion dépend des deux paramètres suivants : le paramètre de contrôle U et la vitesse d'avance du module u (ou bien la vitesse de l'écoulement V). Pour décrire la corrélation de la force F_t^{prop} du propulseur, nous avons choisi le modèle de propulsion bilinéaire décrit par Fossen

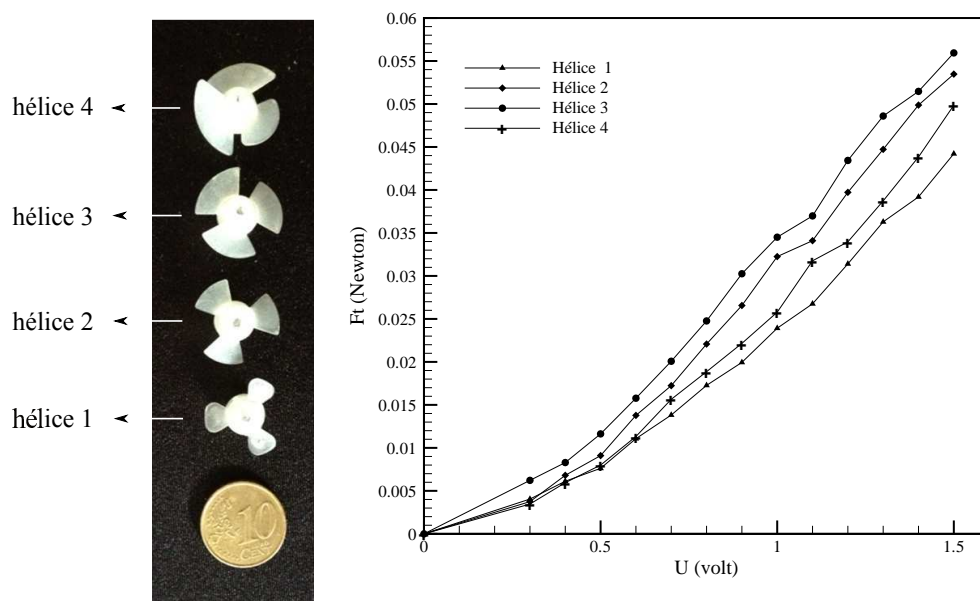


FIGURE 5.10 – Forces de propulsion en régime statique des quatre hélices (photo à gauche).

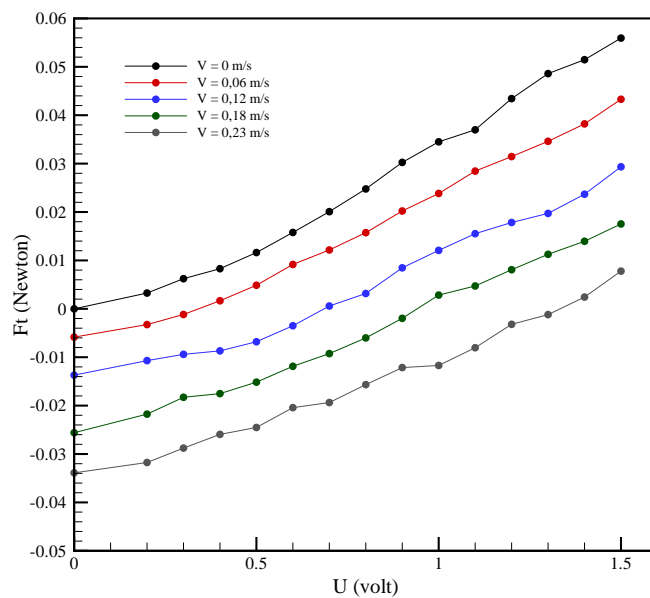


FIGURE 5.11 – Force de propulsion pour différentes vitesses d'écoulement (hélice numéro 3).

(1994), c'est à dire :

$$\begin{aligned}
 F_t^{prop} &= \rho D_{helice}^4 K_t |n|n, \\
 K_t &= \alpha_1 + \alpha_2 J_0, \\
 J_0 &= \frac{V}{n D_{helice}},
 \end{aligned}
 \tag{5.31}$$

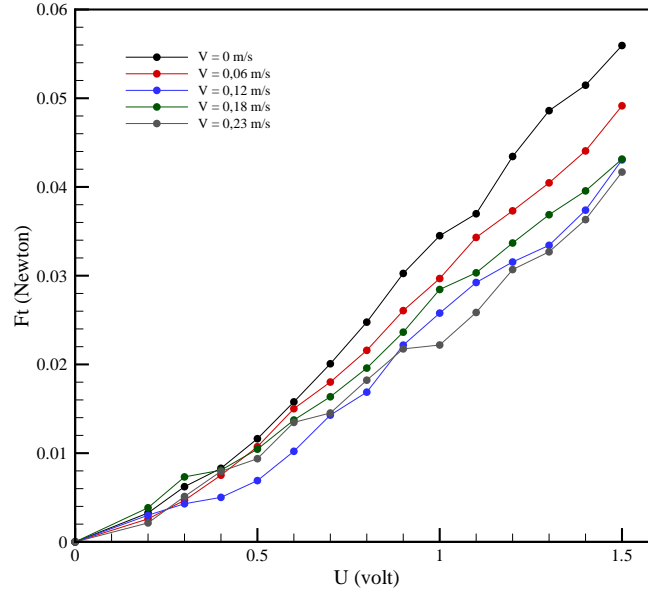


FIGURE 5.12 – Force nette de propulsion en fonction de la tension de contrôle U (sans trainée système).

où J_0 est le nombre d'avancement du module, α_1 et α_2 les deux constantes (à déterminer) du modèles, n le nombre de tour et D_{helice} le diamètre de l'hélice. D'après l'équation 5.31, le coefficient K_t est exprimé comme suit :

$$K_t = \frac{F_t^{prop}}{\rho D_{helice}^4 |n| n}. \quad (5.32)$$

La figure 5.13 présente le coefficient K_t en fonction du nombre de tours n pour différentes vitesses d'écoulement. En effectuant une analyse de régression non linéaire sur les courbes de la figure 5.13, on obtient les deux coefficients $\alpha_1 = 0.00165$ et $\alpha_2 = 0.000095$. D'où F_t devient :

$$F_t^{prop} = \rho D_{helice}^4 n (0.00165n - 0.000095 \frac{V}{D_{helice}}). \quad (5.33)$$

La corrélation de la force de propulsion est une fonction du nombre de tour n de l'hélice et de la vitesse V de l'écoulement. Pour l'intégrer dans le modèle dynamique (cf. équation 5.5), nous remplaçons n par sa relation en fonction de la tension de commande U ($n = K_n U$ de l'équation 5.30) et V par la vitesse linéaire du module u . Alors, on obtient :

$$F_t^{prop} = \rho D_{helice}^4 K_n^2 U (0.00165U - 0.000095 \frac{u}{D_{helice}}) \quad (5.34)$$

Étant donné que les trois propulseurs du module sont parfaitement identiques, la corrélation décrivant la force de chaque propulseur est équivalente à F_t^{prop} . De ce fait, la somme des forces de propulsions appliquées par les propulseurs (prop1) et (prop2) représente la force axiale de

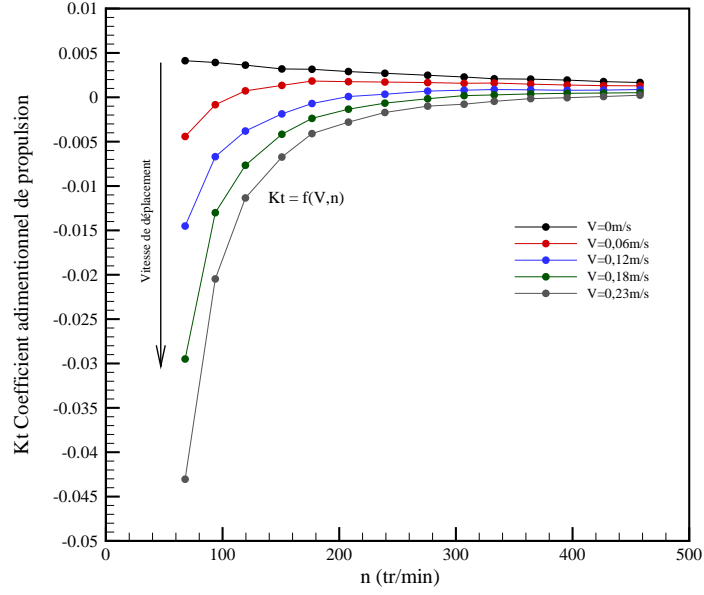


FIGURE 5.13 – Coefficient adimensionnel de la force de propulsion axiale en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice.

propulsion du module F_t . Tant qu'au couple N , il est appliqué par la force latéral du prop3. Finalement, τ est égale à :

$$\tau = \begin{bmatrix} 2D_{helice}^4 K_n^2 U (0.00165U - 0.000095 \frac{u}{D_{helice}}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ l_{(3)x} \rho D_{helice}^4 K_n^2 U (0.00165U - 0.000095 \frac{u}{D_{helice}}) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5.35)$$

où $l_{(3)x}$ est la distance entre l'axe du propulseur (Prop3) et l'axe vertical (y) du module.

A présent, tous les paramètres du modèle dynamique qui correspondent à notre cas d'application sont identifiés. La forme finale (valeurs numériques intégrées) du modèle dynamique est rapportée dans l'annexe D.

5.5 Conclusion

Les travaux de ce chapitre sont dédiés à la modélisation dynamique pour la conception de la commande des modules ANGELS. Le modèle est basé sur une approche lagrangienne

du mouvement dynamique d'un corps solide-rigide dans un fluide. Les différentes matrices du modèles ont été identifiées soit par des approches théoriques soit par des mesures expérimentales, à savoir : la matrice d'inertie (inertie du corps et les masses ajoutées) M , la matrice des forces et moments de coriolis $C(v)$, la matrice de trainée hydrodynamique $D(v)$ et le vecteur des forces et moments externes τ . Le schéma de la figure 5.14 présente l'application de ce travail dans le projet, notamment par l'intégration du modèle dynamique proposé dans le simulateur de commande du module ANGELS.

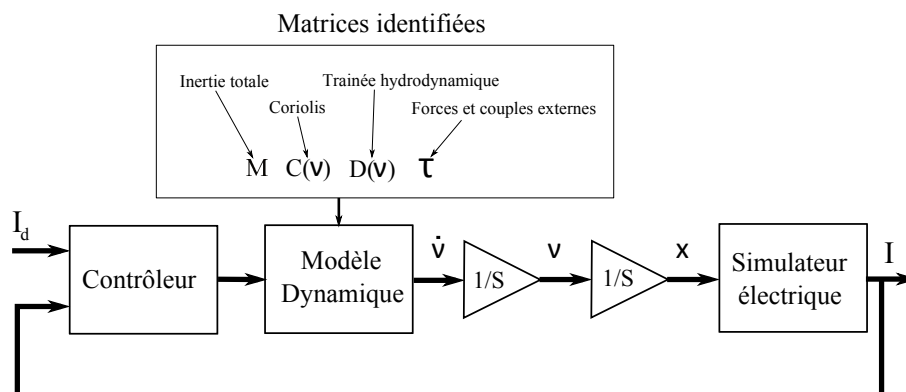


FIGURE 5.14 – Schéma de l'algorithme de commande dont le modèle dynamique a été incorporé.

Plus particulièrement, le contrôleur envoie des consignes (valeurs d'entrées) en tensions (U_1 , U_2 , U_3) au modèle dynamique. Ces valeurs correspondent aux tensions appliquées aux propulseurs du module. Ensuite, ils sont pris en compte dans le modèle dynamique, par le biais de la matrice τ , pour calculer l'accélération et la vitesse du module considéré. Les sorties du modèle dynamique constitue les entrées du modèle physique de la perception par le sens électrique. Ce dernier, aura pour objectif de calculer les consignes en tension en fonction de la position du modules et de son environnement.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Pour améliorer les performances des robots sous-marins, l'une des approches poursuivie par les roboticiens, appelée biomimétisme, consiste à imiter ou à s'inspirer des systèmes vivants pour concevoir des robots de nouvelle génération. C'est dans ce contexte que s'est récemment déroulé un projet européen baptisé ANGELS, dont l'objectif est la réalisation d'un prototype de robot anguille qui soit autonome et reconfigurable. Par ce terme, il est entendu que chacun des modules élémentaires (neuf modules en total), peuvent se regrouper les uns à la suite des autres, de manière à former *in fine* un robot anguilliforme. Cette thèse s'inscrit dans ce projet et est consacré à l'étude expérimentale de la nage du prototype ANGELS dans ces deux configurations : modules regroupés (première configuration) et module élémentaire (deuxième configuration).

Du point de vue du mécanicien, étudier la nage du robot, notamment la première configuration du prototype ANGELS (nage anguilliforme), revient à s'intéresser à trois systèmes dynamiques distincts mais fortement couplés à savoir, (i) la dynamique interne, qui correspond simplement à l'actionnement des degrés de libertés internes du nageur ; (ii) la dynamique du fluide environnant, qui résulte du changement de forme du corps et (iii) la dynamique externe, qui correspond au mouvement d'ensemble du nageur qui est produit par une modification des contraintes exercées par le fluide sur le corps. Les travaux réalisés dans cette thèse, ont contribué à une meilleure compréhension de l'implication de ces phénomènes physiques sur la nage anguilliforme.

Les expériences ont été réalisées dans un canal hydraulique conçu intégralement pour cette étude. Il s'agit d'un banc hydrodynamique à recirculation d'eau, dont au préalable, l'écoulement a été étudié numériquement à l'aide du logiciel de modélisation numérique "ANSYS", pour plusieurs configurations de la géométrie interne. Ensuite, l'écoulement dans la zone d'étude a été calibré. Nous avons obtenu un profil de vitesse, quasi-uniforme, de vitesse moyenne maximale égale à $U_\infty \simeq 0.4$ m/s, dans une section de mesure de $0.45 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ environ.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé les allures (i.e. les lois de déformation du corps) adoptées par une anguille réelle nageant dans un écoulement uniforme incident. Pour ce faire, nous avons mis en place une procédure expérimentale permettant à partir d'une vidéo de nage, d'extraire les caractéristiques de la loi de déformation du corps. Cette procédure est

composée en trois parties essentielles : l'acquisition vidéo, le traitement d'image et l'identification des paramètres de la loi de déformation du corps.

Durant nos observations, nous avons identifié deux allures adoptées par l'anguille, nageant soit dans un écoulement frontal (contre courant) ou dans un courant traversier (nage en biais). Dans le premier cas (nage contre courant), les études dans la littérature portant sur cette allure sont nombreuses et la loi de déformation du corps est bien décrite. Dans le deuxième cas, à notre connaissance, ce type de nage n'a pas été étudié jusqu'à présent. Dans ce cas de figure, les allures de nages changent et une dissymétrie apparaît, en comparaison au cas de nage contre courant où une onde symétrique se propage le long du corps. Nous avons étudié les caractéristiques des allures dans ces conditions, ce qui a donné lieu à l'établissement d'un modèle mathématique corrélatif généralisé de la déformation du corps de l'anguille lors de la nage.

Dans un second temps, nous avons étudié la dynamique du fluide, plus précisément, l'écoulement latéral (i.e. perpendiculaire au corps) produit en réponse à la déformation du corps (dynamique interne), lors de la nage. Nous avons identifié deux paramètres ayant un effet sur la structure de l'écoulement latéral : la courbure et la variation de la taille de la section du corps. Pour étudier l'effet de chaque paramètre, des expériences ont été réalisées sur des modèles cylindriques, de section elliptique variable et de courbures différentes.

Cette étude a nécessité la mise en place d'une procédure expérimentale complexe. La méthode de mesure PIV nous a permis d'analyser l'écoulement produit dans les sections latérales (perpendiculaire) des cylindres. En effet, pour pouvoir mesurer l'écoulement dans ces conditions, nous avons immergé une caméra CCD dans l'eau dans un caisson étanche. Pour l'étude de chaque paramètre (effet de section ou de courbure) une configuration expérimentale correspondante a été mise en place.

D'après nos résultats, nous avons déduit que la variation de la taille de la section ainsi que la courbure du corps présentent un effet significatif sur la structure de l'écoulement dans la section latérale.

La variation de la section droite d'un coefficient de 0.1 produit un déplacement radial de l'écoulement incident, d'une vitesse égale à environ 2% de la vitesse axiale. Quant à la courbure du corps, la perturbation produite par le déplacement latéral de l'ensemble du corps courbé, produit une dissymétrie dans la structure de l'écoulement, par rapport à l'écoulement potentiel produit par un cylindre elliptique de courbure nulle. Cette dissymétrie s'accroît lorsque la courbure du corps augmente.

Ces résultats nous ont permis de mieux comprendre et de valider un modèle théorique développé dans le cadre du projet ANGELS, basée sur le modèle dynamique établie par Lighthill (dite LAEBT), permettant de calculer la force de propulsion en réponse à la loi de déformation du corps.

Concernant la dynamique externe du corps, nous avons étudié les interactions hydrodynamiques survenant lors de la nage anguilliforme dans un écoulement non-uniforme de type allée

de Bernàrd von-Kàrmàn (BvK). Durant cette étude, nous avons mis en évidence certains mécanismes d'extraction d'énergie de l'écoulement, permettant sous certaines conditions, d'optimiser les performances hydrodynamiques de la nage. Ces expériences ont été réalisées sur la nage d'un robot anguilliforme ainsi que sur la nage d'une anguille naturelle.

Nous avons conçu, spécialement pour cette étude, un système à double aileron oscillants, permettant de générer dans son sillage une allée BvK à partir de deux allées BvK inversées.

Les expériences menées sur le robot ont permis de réaliser une étude paramétrique de la force hydrodynamique de propulsion, mesurée à l'aide d'un capteur de force, pour différentes configurations entre le robot et l'allée de Bernàrd von-Kàrmàn.

Les résultats montrent que pour une même loi de déformation du corps, la force de propulsion générée, en comparaison avec le cas de l'écoulement uniforme, peut sous certaines conditions être augmentée de près de 30 %.

Les expériences menées sur les anguilles réelles, quant à elles, ont permis de mettre clairement en évidence une modification de l'allure de nage de l'anguille lorsqu'elle est placée dans une allée BvK inversée. Cette allure particulière de nage ne semble pas avoir fait l'objet d'une quelconque description dans la littérature.

En effectuant une analyse qualitative de cette nouvelle allure, et en se basant sur une approche théorique permettant d'obtenir la force exercée par un écoulement quelconque (de type BvK inversée par exemple) sur le corps lors de la nage, un mode d'extraction d'énergie de l'écoulement environnant est proposé.

Finalement, nous avons effectué une étude annexe, visant la deuxième configuration du prototype ANGELS. Il s'agit ici de fournir les données nécessaires à l'établissement d'un modèle dynamique de nage à l'usage des automaticiens du projet. Le module est équipé de propulseurs à hélice assurant sa navigation dans un plan. De ce fait, nous avons choisi le modèle dynamique du déplacement d'un corps solide-rigide évoluant dans un milieu fluide, dérivant d'une approche lagrangienne basée sur la description vectorielle du mouvement fournie par kirchoff. Les composants du modèle ont été identifiés d'une part par des calculs théoriques (inertie, coriolis) existant dans la littérature et d'autre part par des mesures expérimentales (caractéristiques hydrodynamiques). Le modèle dynamique obtenu est actuellement en cours d'implémentation dans un simulateur de commande du module développé par les automaticiens du projet.

Perspectives

Les résultats que nous avons obtenus dans le cadre de cette thèse nous encouragent à poursuivre cette étude avec plusieurs nouveaux objectifs.

Une première perspective intéressante serait d'étudier d'un point de vue hydrodynamique les forces exercées par le fluide sur le corps lors de la nage anguilliforme dans un courant traversier. Cette étude peut être réalisée numériquement en utilisant le modèle généralisé, décrivant la déformation du corps lors de la nage anguilliforme, développé dans cette thèse. Cela permettra

aussi, d'effectuer une étude comparative entre la force de propulsion nécessaire, lors d'une ondulation axiale (oscillation symétrique du corps) et non-axiale (non-symétrique), d'un poisson nageant dans un courant incident traversier. Par ailleurs, une étude approfondie sur l'effet de la variation du paramètre géométrique (angle de nage) sur l'allure de nage serait intéressante à mener. En augmentant le nombre de séquence de nage en biais, il serait possible de réaliser une analyse statistique "ANOVA" permettant d'étudier le comportement des paramètres de la loi de déformation en fonction de l'angle de nage.

La nage dans un écoulement tourbillonnaire, notamment la nage en groupe, présente un sujet riche et peu exploité dans le domaine de la robotique biomécanique. Dans ce contexte, les différents travaux expérimentaux présents dans la littérature, sont focalisés sur la nage dans un écoulement BvK généré en aval d'un obstacle (cylindre, plaque...). Les instrumentations ainsi que les matériels misent en place durant les travaux de cette thèse, plus particulièrement, la génération d'une allée BvK à partir de deux allées BvK inversées, ouvre la voie vers de nombreux objectifs et perspectives. Par exemple, dans cette thèse, nous avons étudié la force d'interaction hydrodynamique de la nage anguilliforme dans le sillage de deux ailerons en oscillation de phase. Dans le contexte de la nage en groupe, cela signifie que les poissons placés en avant et côte à côte, ondulent leur corps en phase. En revanche, une question se pose aujourd'hui : durant la nage en groupe, lesquelles des deux configurations, l'oscillation en phase ou en opposition de phase, est plus avantageux pour le poisson placé en quinconce en aval ? La réponse à cette question constitue un objectif d'étude très intéressant. De plus, les résultats obtenus sur les forces d'interactions lors de la nage du robot dans l'allée BvK encouragent d'effectuer des expériences encore plus approfondies, en variant d'autres paramètres, tels que celles de l'allée BvK (largeur de l'allée, longueur d'onde...) et de la loi de commande du robot.

Enfin, l'étude réalisée dans cette thèse s'est limitée à la nage anguilliforme. Il serait intéressant d'étudier le comportement d'autres modes, tel que carrangiforme, lors de la nage dans l'écoulement tourbillonnaire généré par le système d'oscillation à double ailerons.

Bibliographie

- ALBAGUL, A. et WAHYUDI (2004). Dynamic modeling and adaptive traction control for mobile robots. *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*, 1:614–620.
- ALBEN, S. (2010). Passive and active bodies in vortex-street wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 642:95–125.
- ALLEN, J. J. et SMITS, A. (2001). Energy harvesting eel. *Journal of Fluids and Structures*, 15(3–4):629 – 640.
- ANDERSON, J. M., STREITLIEN, K., BARRETT, D. S. et TRIANTAFYLLOU, M. S. (1998). Oscillating foils of high propulsive efficiency. *Journal of Fluid Mechanics*, 360:41–72.
- BARETT, D. S. (1996). *Propulsive efficiency of a flexible hull underwater vehicle*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- BEAL, D. N., HOVER, F. S., TRIANTAFYLLOU, M. S., LIAO, J. C. et LAUDER, G. V. (2006). Passive propulsion in vortex wakes. *Journal of fluid mechanics*, 549:385–402.
- BERGMANN, M. et IOLLO, A. (2011). Modeling and simulation of fish-like swimming. *Journal of Computational Physics*, 230(2):329 – 348.
- BLAKE, R. W. (1991). *Fish locomotion*. Cambridge University Press.
- BLAKE, R. W. (2004). Fish functional design and swimming performance. *Journal of Fish Biology*, 65(5):1193–1222.
- BLICKHAN, R., KRICK, C., ZEHREN, D., NACHTIGALL, W. et BREITHAUPT, T. (1992). Generation of a vortex chain in the wake of a undulatory swimmer. *Naturwissenschaften*, 79:220–221.
- BOYER, F., CHABLAT, D., LEMOINE, P. et WENGER, P. (2009). The eel-like robot. *CoRR*, abs/0908.4464.
- BREDER, C. M. (1926). The locomotion fishes. *Zoologica*, 4:159–256.

- CANDELIER, F., BOYER, F. et LEROYER, A. (2011). Three-dimensional extension of lighthill's large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion. *Journal of Fluid Mechanics*, 674: 196–226.
- CANDELIER, F., POREZ, M. et BOYER, F. (2012). Note on the swimming of an elongated body in a non-uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 716:616–637.
- COIRIER (2001). *Mécanique des Milieux Continus*. Dunod, Paris.
- COLGATE, J. et LYNCH, K. (2004). Mechanics and control of swimming : a review. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 29(3):660 – 673.
- COLOMBIER, S. B. D., BOLLIET, V., LAMBERT, P. et BARDONNET, A. (2007). Energy and migratory behavior in glass eels (*anguilla anguilla*). *Physiology and Behavior*, 92(4):684 – 690.
- CRESPI, A. et IJSPEERT, A. J. (2008). Online optimization of swimming and crawling in an amphibious snake robot. *IEEE Transaction on Robotics*, 24:75–87.
- D'AOUT, K. et AERTS, P. (1999). A kinematic comparison of forward and backward swimming in the eel *anguilla anguilla*. *Journal of Experimental Biology*, 202(11):1511–1521.
- DOMENICI, P. et BLAKE, R. (1997). The kinematics and performance of fish fast-start swimming. *Journal of Experimental Biology*, 200(8):1165–78.
- DONLEY, J. M. et DICKSON, K. A. (2000). Swimming kinematics of juvenile kawakawa tuna (*euthynnus affinis*) and chub mackerel (*scomber japonicus*). *Journal of Experimental Biology*, 203(20):3103–3116.
- ELDREDGE, J. et PISANI, D. (2008). Passive locomotion of a simple articulated fish-like system in the wake of an obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*, 607(17):279–288.
- ELOY, C. (2012). Optimal strouhal number for swimming animals. *Journal of Fluids and Structures*, 30:205 – 218.
- ELOY, C. et SCHOUVEILER, L. (2011). Optimisation of two-dimensional undulatory swimming at high reynolds number. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46(4):568 – 576.
- FAUSCH, K. D. (1996). Experimental analysis of microhabitat selection by juvenile steel head (*oncorhynchus mykiss*) and coho salmon (*o. kisutch*) in a british columbia stream. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38:1220–1227.
- FAUSCH, K. D. et WHITE, R. J. (1981). Competition between brook trout (*salvelinus fontinalis*) and brown trout (*salmo trutta*) for positions in a michigan stream. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 38:1220–1227.
- FOSSEN, T. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley and sons, New York.

- GILLIS, G. B. (1996). Undulatory locomotion in elongate aquatic vertebrates : Anguilliform swimming since sir james gray. *Amer. Zool.*, 36:279–290.
- GILLIS, G. B. (1998). Environmental effects on undulatory locomotion in the american eel *anguilla rostrata* : kinematics in water and on land. *Journal of Experimental Biology*, 201(7): 949–961.
- GODOY-DIANA, R., AIDER, J.-L. et WESFREID, J. E. (2008). Transitions in the wake of a flapping foil. *Phys. Rev. E*, 77:016308.
- GRAHAM, J. B. et DICKSON, K. A. (2004). Tuna comparative physiology. *Journal of experimental biology*, 207(23):4015–4024.
- GRAY, J. (1933). Studies in animal locomotion, i.the movement of fish with special reference to the eel. *Journal of Experimental Biology*, 10:88–104.
- GRAY, J. (1935). Studies in animal locomotion, vi. the propulsive powers of the dolphin. *Journal of Experimental Biology*, 13:170–199.
- HERSKIN, J. et STEFFENSEN, J. F. (1998). Energy savings in sea bass swimming in a school : measurements of tail beat frequency and oxygen consumption at different swimming speeds. *Journal of Fish Biology*, 53(2):366–376.
- JAYNE, B. (1986). Kinematics of terrestrial snake locomotion. *Copeia*, pages 195–208.
- KERN, S. et KOUMOUTSAKOS, P. (2006). Simulations of optimized anguilliform swimming. *Journal of Experimental Biology*, 209(24):4841–4857.
- LAMB, H. (1932). *Hydrodynamics*. Cambridge University Press.
- LAUDER, G. V. et TYTELL, E. D. (2005). Hydrodynamics of undulatory propulsion. *Fish Physiology*, 23011(4):425–468.
- LEONARD, N. (1997). Stability of a bottom-heavy underwater vehicle. *Automatica*, 33:331–346.
- LIAO, J. (2007). A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 362(1487):1973–1993.
- LIAO, J. C., BEAL, D. N., LAUDER, G. V. et TRIANTAFYLLOU, M. S. (2003a). Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science*, 302(5650):1566–1569.
- LIAO, J. C., BEAL, D. N., LAUDER, G. V. et TRIANTAFYLLOU, M. S. (2003b). The karman gait : novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street. *Journal of experimental biology*, 206(6):1059–1073.
- LIGHTHILL, M. J. (1971). Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 179(1055):125–138.

- LIN, X. et AL. (2009). A simplified dynamics modeling of a spherical underwater vehicle. *International conference on Robotics and Biomimetics*, pages 1140–1145.
- MÜLLER, U. K., HEUVEL, B. L. E. V. D., STAMHUIS, E. J. et VIDELER, J. J. (1997). Fish foot prints : morphology and energetics of the wake behind a continuously swimming mullet (*chelon labrosus risso*). *Journal of Experimental Biology*, 200(22):2893–906.
- MÜLLER, U. K., SMIT, J., STAMHUIS, E. J. et VIDELER, J. J. (2001). How the body contributes to the wake in undulatory fish swimming : Flow fields of a swimming eel (*anguilla anguilla*). *Journal of Experimental Biology*, 204(16):2751–2762.
- MUNK, Y. (2008). Kinematics of swimming garter snakes (*thamnophis sirtalis*). *Comparative biochemistry and physiology a-molecular and integrative physiology*, 150(2):131–135.
- NAUEN, J. C. et LAUDER, G. V. (2002). Quantification of the wake of rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) using three-dimensional stereoscopic digital particle image velocimetry. *Journal of Experimental Biology*, 205(21):3271–3279.
- POREZ, M. (2007). *Modèle dynamique analytique de la nage tridimensionnelle anguilliforme pour la robotique*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- SAKAKIBARA, J., NAKAGAWA, M. et YOSHIDA, M. (2004). Stereo-piv study of flow around a maneuvering fish. *Experiments in Fluids*, 36:282–293.
- SCHNIPPER, T., ANDERSEN, A. et BOHR, T. (2009). Vortex wakes of a flapping foil. *Journal of Fluid Mechanics*, 633:411–423.
- SFAKIOTAKIS, M., LANE, D. et DAVIES, J. (1999). Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 24(2):237–252.
- SHENG, J., YSASI, A., KOLOMENSKIY, D., KANSO, E., NITSCHKE, M. et SCHNEIDER, K. (2012). Simulating vortex wakes of flapping plates. In CHILDRESS, S., HOSOI, A., SCHULTZ, W. W. et WANG, J., éditeurs : *Natural Locomotion in Fluids and on Surfaces*, volume 155, pages 255–262. Springer New York.
- SPARENBERG, J. (2002). Survey of the mathematical theory of fish locomotion. *Journal of Engineering Mathematics*, 44:395–448.
- STEFANINI, C. et AL. (2012). A novel autonomous, bioinspired swimming robot developed by neuroscientists and bioengineers bioinspir. *Biomim*, 2.
- STREITLIEN, K. et AL. (1996). Efficient foil propulsion through vortex control. *Aiaa journal*, 34(11):2315–2319.
- SVENDSEN, J. C., SKOV, J., BILDSOE, M. et STEFFENSEN, J. F. (2003). Intra-school positional preference and reduced tail beat frequency in trailing positions in schooling roach under experimental conditions. *Journal of Fish Biology*, 62(4):834–846.

- TRIAANTAFYLLOU, M. S. et TRIAANTAFYLLOU, G. S. (1995). An efficient swimming machine. *Scientific America*, 272:64–70.
- TRIAANTAFYLLOU, M. S., TRIAANTAFYLLOU, G. S. et YUE, D. K. P. (2000). Hydrodynamics of fishlike swimming. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1):33–53.
- TYTELL, E. D. (2004a). The hydrodynamics of eel swimming ii. effect of swimming speed. *Journal of Experimental Biology*, 207(19):3265–3279.
- TYTELL, E. D. (2004b). Kinematics and hydrodynamics of linear acceleration in eels, *anguilla rostrata*. *Proceedings of the royal society B-biological sciences*, 271(1557):2535–2540.
- TYTELL, E. D. et LAUDER, G. V. (2004). The hydrodynamics of eel swimming - i. wake structure. *Journal of Experimental Biology*, 207(11):1825–1841.
- WANG, S. X., SUN, X. J., WANG, Y. H., WU, J. G. et WANG, X. M. (2011). Dynamic modeling and motion simulation for a winged hybrid-driven underwater glider. *China Ocean Eng.*, 25:97–112.
- WANG, W. et CLARK, C. (2006). Modeling and simulation of the videoray pro iii underwater vehicle. *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, 1:1–7.
- WEBB, P. W. (1988). Simple physical principles and vertebrate aquatic locomotion. *American zoologist*, 28(2):709–725.
- WEBB, P. W. (1998). Entrainment by river chub *nocomis micropogon* and smallmouth bass *micropterus dolomieu* on cylinders. *Journal of experimental biology*, 201:2403–2412.
- WHEIS, D. (1973). Hydrodynamics of fish schooling. *Nature*, 241:290–291.
- WOLFGANG, M., TRIAANTAFYLLOU, M. et YUE, D. (1999). Visualization of complex near-body transport processes in flexible-body propulsion. *Journal of Visualization*, 2:143–151.
- XICHUAN, L., SHUXIANG, G., YANLING, H., XIUFEN, Y., CHENGUANG, Q. et JUAN, D. (2009). A simplified dynamics modeling of a spherical underwater vehicle. In *Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on*, pages 1140 –1145.
- XU, H. J., PAN, C. Y., XIE, H. B. et ZHANG, D. B. (2008). Dynamic modelling and simulation of a bionic swim bladder system in underwater robotics. *Journal of Bionic Engineering*, 5:66–71.
- YAMADA, H., CHIGISAKI, S., MORI, M., TAKITA, K., OGAMI, K. et HIROSE, S. (2005). Development of amphibious snake-like robot acm-r5. In *36th International Symposium on Robotics*.

Annexes

Annexe A

A.1 Conception et modélisation numérique de l'écoulement dans le banc d'essai

L'objectif de cette partie est de présenter un aperçu de l'étude numérique portant sur l'écoulement dans le banc d'essai, par les dimensionnements de la géométrie interne (aubes, section de séparation), dont le but d'obtenir un écoulement uniforme dans la zone de visualisation. Des simulations CFD ont été réalisées pour différentes configurations de géométrie interne. Pour chaque cas, la géométrie a été conçue à l'aide d'un logiciel CAO appelé « ANSYS Workbench tool ». Le maillage est créé en « ICEM-11,0 tool ». Tous les calculs numériques ont été effectués en utilisant la technologie du logiciel commercial « CFX ANSYS 11.0 ».

La stratégie de maillage utilisée consiste en la création d'un bloc principal décomposé en plusieurs blocs d'une façon bien déterminée, et une O-GRID dont la section circulaire a été bien prise en compte. Chaque arrête de chaque bloc est associée à une courbe de la géométrie. En outre, pour modéliser finement les couches limites qui se développent au voisinage d'une paroi et pour assurer une bonne qualité de maillage, des maillages relativement fins ont été utilisés au voisinage des parois et des aubes. Des éléments de maillage hexaédrique en 3D ont été utilisés. La stratégie de multi-bloc et un exemple de maillage sont présentés sur les figures A.1(a) et A.1(b).

A l'entrée, une vitesse constante a été fixée comme condition. A la sortie, les conditions ambiantes ont été fixées à la pression atmosphérique. Une condition d'adhérence (fluide réel) a été imposée sur les parois.

A partir des simulations CFD, on a observé qu'en raison de la pression négative apparaissant derrière les aubes, un décollement de l'écoulement a été observé et des grands tourbillons sont générés. Ces flux ne sont pas souhaitables dans le système, le débit doit être le plus uniforme possible. Ainsi, il a été entrepris d'étudier plusieurs configurations en faisant varier le nombre d'aubes, leurs courbures et la hauteur de la section de séparation.

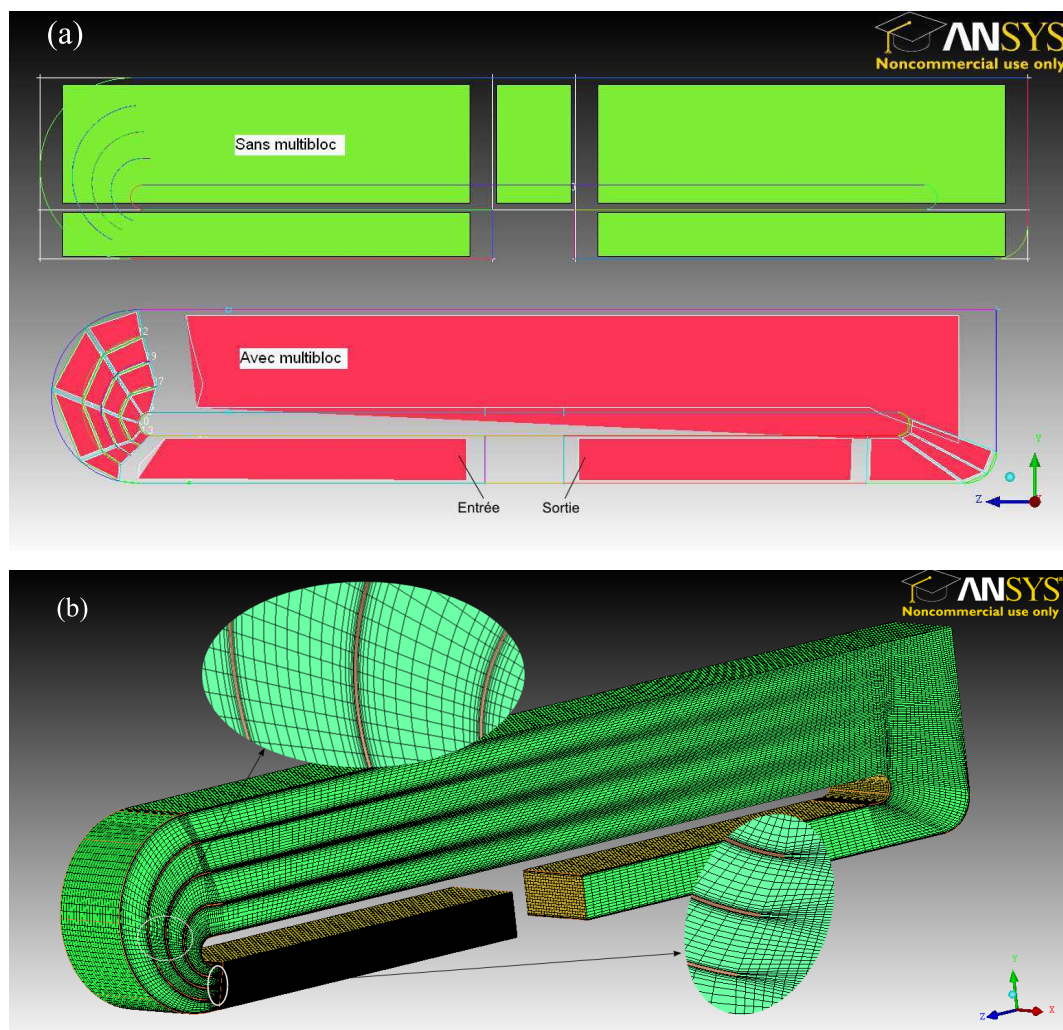


FIGURE A.1 – (a) stratégie de multibloc, (b) Vue isométrique du maillage de la géométrie

TABLE A.1 – Paramètres de quatre configurations étudiées

	$h(m)$	N	Longueur $L_i(m)$
Cas 1	0.05	2	$L_1 = 1.22, L_2 = 0.63$
Cas 2	0.15	2	$L_1 = 1.22, L_2 = 0.63$
Cas 3	0.15	3	$L_1 = 1.18, L_2 = 0.82, L_3 = 0.52$
Cas 4	0.15	3	$L_1 = 1.28, L_2 = 0.99, L_3 = 0.72$

A.2 Résultats numériques

Chaque nouvelle configuration était modifiée à partir des résultats obtenus dans la précédente. Une fois cette configuration changée, le maillage de la nouvelle configuration est remis à jour. Huit configurations ont été étudiées en variant la position de la section de séparation (h la hauteur par rapport au fond de l'aquarium), le nombre des aubes (N) et ainsi que leurs longueurs (L longueur d'un arc de cercle). A titre d'exemple, le tableau A.1 présente quatre configurations étudiées.

La première configuration étudiée (cas 1) présente une épaisseur de 5 cm de la section de séparation et deux aubes placées en amont de la zone de visualisation. Un phénomène de décollement de couches limites important a été observé au voisinage des aubes et de la section de séparation. Ces décollements perturbent l'écoulement et son uniformité dans la zone de visualisation. Pour ce fait, nous avons augmenté la distance qui sépare la section du fond du bassin (la hauteur de la section de séparation de 0.5 à 15 m (cas 2)) en gardant les autres paramètres inchangeable. La figure A.2 montre respectivement le contour de vitesse dans le tunnel et les profils de vitesse dans le plan de symétrie à différentes abscisses de la zone de visualisation pour les deux cas 2 et 4 présentés dans le Table A.1.

Sur la figure A.2 (a), l'augmentation de la hauteur de la section de séparation a amélioré l'écoulement dans le tunnel. En revanche, nous pouvons constater que plusieurs décollements très importants sont toujours générés au niveau des aubes et de la partie supérieure de la section. De plus, l'écoulement ne présente pas le profil de vitesse attendu dans la zone de visualisation.

Nous avons alors ajouté une troisième aube et nous avons fait varier leur dimension et leurs positionnements. Plusieurs configurations ont été traitées afin d'améliorer la nature de l'écoulement dans le tunnel. La dernière configuration présentée dans le tableau A.1 a été retenue pour la construction du banc. Le contour d'écoulement ainsi que les profils de vitesse dans différentes sections de la zone de visualisation sont présentés dans la figure A.2 (b). L'augmentation du nombre des aubes ainsi que l'augmentation de leur longueur ont amélioré le profil de vitesse dans la zone de visualisation. Les décollements de couches limites ont été compensés par rapport aux cas précédents (cas 2). De plus, nous observons d'après le graphique de la figure A.2

(b), une distribution des champs de vitesses quasiment uniforme tout le long de la zone de visualisation. Parmi les huit configurations étudiées, le cas 4 représente le meilleur profil de vitesse obtenu par les calculs CFD de l'écoulement. La mise en place du banc d'essai et la construction des aubes ont été effectuées après la validation numérique de la géométrie intérieure.

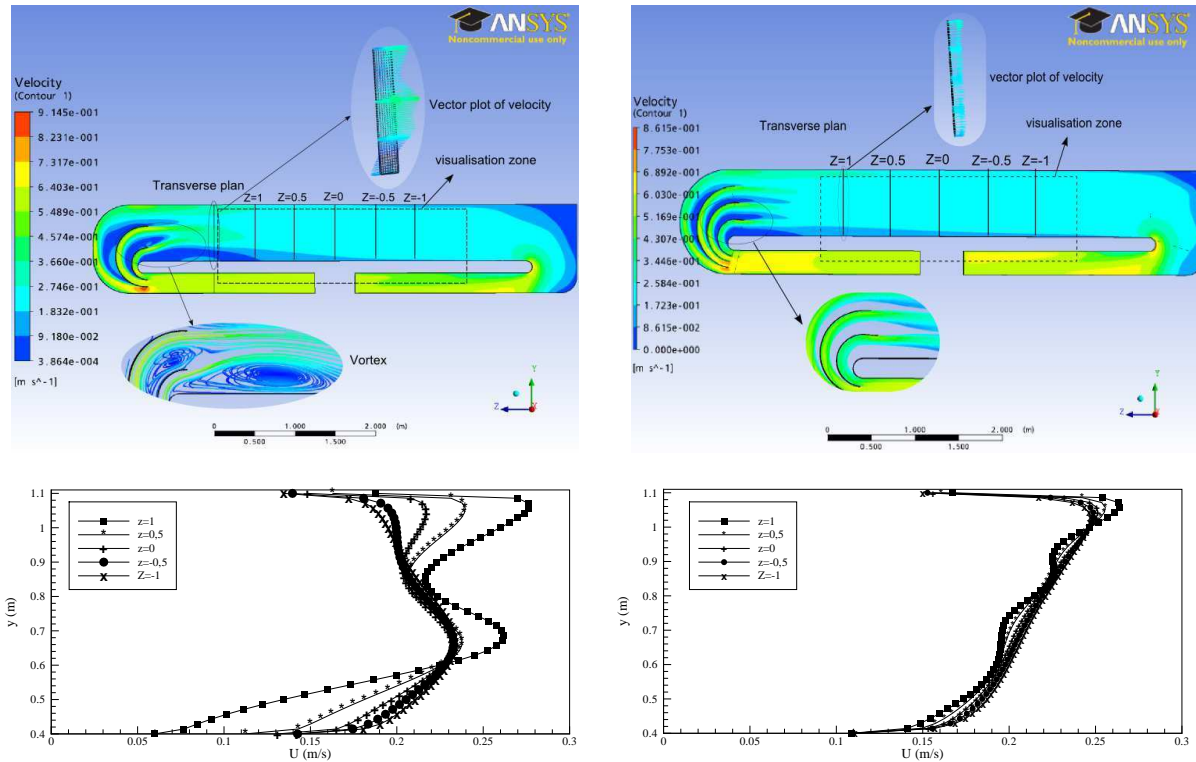


FIGURE A.2 – (a) Cas 2, (b) cas 4, contour de vitesse de l'écoulement et profil de vitesse dans le plan de symétrie à différentes abscisses de la zone de visualisation

Annexe B

B.1 Algorithme de calcul théorique de l'écoulement dans la section latéral du corps durant la nage

L'algorithme de calcul développé sous le langage "Matlab", permettant de calculer le champ de vitesses latéral produit dans la section perpendiculaire du corps lors de la nage, est présenté dans ce qui suit.

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  %% Calcul du champ de vitesse lateral dans la section perpendiculaire %%%
3 %% d'un corps lors de la nage %%%
  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5
  %% Propriete geometrique de la section elliptique du corps
7 clear all;
  alpha=; % demi grand-axe
9 beta=; % demi petit-axe
  a=sqrt(alpha^2+beta^2); % demi-distance focale
11 K=; % courbure locale du corps

13 %% coefficient de la variation de la section du corps
  d_alpha_dX=0; % X abscisse curviligne
15 d_beta_dX=0;

17 %% vitesses du deplacement du corps dans le repere cartesien
  Vz=; %deplacement lateral de l'ensemble du corps courbee
19 Vx=; %deplacement axial du corps de section variable

21 %% creation du plan de repere elliptique (u,v)
  [Y,Z] = meshgrid(-5:0.1:5);
23 Zeta= Y + i*Z;
  u=real(acosh(Zeta./a));
25 v=imag(acosh(Zeta./a));
  u_0=1/2*log((alpha+beta)/(alpha-beta)); % coordonnee de la section
27 % elliptique 0\leq v \leq 2pi

29 %% la jacobienne de transformation elliptique/cartesien
  J=a^2*(cosh(u).^2 - cos(v).^2);
31 % nettoyage des zeros de J
  'nettoyage'
33 [m n]=size(J);
  for i=1:m
```

```

35     for j=1:n
36         if J(i,j)<1.e-8
37             J(i,j) = 1.e-8;
38         end
39     end
40 end
41
42 %% direvees partielles du potentiel de vitesses dans le repere elliptique
43 % (d_phi=d_phi(parral)+d_phi(perpen))
44
45 d_phi_du=Vz*alpha*exp(u_0-u).*sin(v)...
46     -1/4*a*exp(-u_0)*alpha*Vz*K*(1-exp(2*u_0-2*u))...
47     -1/2*Vx*(d_alpha_dX*beta+alpha*d_beta_dX)...
48     -1/2*Vx*(d_alpha_dX*beta-alpha*d_beta_dX)*cos(2*v).*exp(2*u_0-2*u);
49
50 d_phi_dv=-Vz*alpha*cos(v).*exp(u_0-u)...
51     +1/4*a*exp(u_0)*alpha*Vz*K.*sin(2*v)...
52     -1/2*Vx*(d_alpha_dX*beta-alpha*d_beta_dX)*sin(2*v).*exp(2*u_0-2*u);
53
54 %% Le champ de vitesse dans la section lateral dans le repere cartesien
55
56 U=a./J.*(sinh(u).*cos(v).*d_phi_du - cosh(u).*sin(v).*d_phi_dv);
57 V=a./J.*(cosh(u).*sin(v).*d_phi_du + sinh(u).*cos(v).*d_phi_dv);
58
59 %% U et V composante de la vitesse de l'ecoulement dans la section laterale
60 % du corps

```

Annexe C

Cette annexe présente l'approche théorique suivie afin d'identifier l'effet d'un faible décalage de fréquence, entre la loi de nage du robot et l'écoulement périodique (BvK) généré dans le sillage du système d'ailerons oscillant, sur la valeur de phase présentée dans nos résultats. Notons que, ce décalage ne présente pas un effet significatif sur l'analyse quantitative de la force. Cet effet vise la période de la courbe de la force moyenne, tracée en fonction de la phase entre le robot et l'allée BvK, que nous l'avons variée pendant l'expérimentation en déplaçant le robot dans l'allée BvK.

C.1 Décalage de fréquence entre le robot et l'allée BvK

Considérons que la loi de commande du robot est une fonction périodique :

$$f_T^r \left(\frac{2\pi X}{\lambda} + \omega^r t + \varphi \right) \quad (\text{C.1})$$

où X est la coordonnée curviligne liée au corps du robot, λ la longueur d'onde, $\omega^r = (2\pi)/T^r$ la pulsation du corps (T^r la période d'ondulation) et φ le déphasage. De même, l'écoulement externe est une fonction périodique :

$$f_T^f \left(\frac{2\pi x}{\lambda_a} + \omega^f t \right) \quad (\text{C.2})$$

On considère que la fréquence d'oscillation des ailerons (f_a qui est équivalente à la fréquence du fluide f_f) est plus grande que celle du robot ($f_f > f_r$) :

$$\text{Soit : } \omega_f = \omega_r + \Delta\omega \quad , \quad \Delta\omega = 2\pi\Delta f,$$

en remplaçant ω_f dans l'équation C.2, on obtient :

$$f_T^f \left(\frac{2\pi x}{\lambda_a} + (\omega^r + \Delta\omega)t \right) \quad (\text{C.3})$$

en effectuant le changement de variable suivant :

$$x \rightarrow x_2 \quad : \quad x_2 = x + \frac{\lambda_a t \Delta\omega}{2\pi}$$

l'équation C.3 devient :

$$f_T^f \left(\frac{2\pi x_2}{\lambda_a} + \omega_r t \right) \quad (\text{C.4})$$

D'après l'équation C.4, une différence de fréquence Δf entre l'oscillation des ailerons et l'ondulation du robot se traduit comme un déplacement du robot $x_\varphi = \lambda_a t \Delta \omega / 2\pi$ qui est de plus une fonction de temps t . Alors, même si la différence de fréquence est très faible, le déphasage peut être significatif si le temps est important. On conclut que pendant le temps nécessaire d'expérimentation, le robot s'est déplacé fictivement (déphasage) d'une distance qui est une fonction de deux variables : le temps de mesure (t_{mesure}) et la différence de fréquence Δf .

Maintenant nous allons estimer la valeur de cette différence de fréquence, à l'aide des résultats expérimentaux présenté dans la section 4.3.2 du chapitre 4 de ce manuscrit, notamment les essais N°1 et N°3.

C.1.1 Estimation de la différence de fréquence

Considérant que la fréquence des vortex f_f et la fréquence d'ondulation du robot f_r sont parfaitement identiques, alors, quelque soit le temps d'échantillonnage, la période de phase de la courbe de force doit être égale à 2π .

Pour l'essai N°1, la différence des périodes de phase est égale à :

$$\Delta \phi_1 = 2\pi - \varphi_1 = 2\pi \left(\frac{\lambda_a - \Delta x_{\varphi_1}}{\lambda_a} \right)$$

Durant le temps nécessaire pour réaliser l'essai, le robot s'est donc déplacé fictivement d'une valeur $x_{fictif_1} = \lambda_a - \Delta x_{\varphi_1} = 0.111m$. Sachant que le nombre de position (position dont la force a été mesurée) qui couvre une période de phase de la courbe de force est égal à 5, nous déduisons que le déplacement fictif, correspondant à la mesure effectuée sur une seule position, est égale à $\Delta x_{fictif_1} = x_{fictif_1} / 5 = 0.022m$. En appliquons le même raisonnement dans le cas de l'essai N°3, le déplacement fictif est égal à $\Delta x_{fictif_3} = 0.0355m$.

Nous avons montré que l'expression du déplacement fictif de la différence de fréquence est une fonction du temps : $x_\varphi(t) = \lambda_a t \Delta \omega / 2\pi = \lambda_a t \Delta f$, alors $t \Delta f = x_\varphi(t) / \lambda_a$.

Connaissant le temps écoulé pendant la mesure de force à une position de robot donnée, nous calculons la différence de fréquence dans les deux cas. Pour l'essai N°1, le temps d'échantillonnage est égale à $T_{echant}^1 = 30.7s$ soit $\Delta f_1 = 0.00312Hz$ et pour l'essai N°3, $T_{echant}^3 = 51.3s$ soit $\Delta f_3 = 0.00297Hz$.

Nous déduisons d'après ce calcul, que la différence de fréquence estimée entre l'onde propagée sur le robot (réelle) et l'allée BvK est de 10^{-3} près ($\Delta f = 0.003Hz$).

Annexe D

Cet annexe présente le modèle dynamique du robot ANGELS dans sa version numérique.

D.1 Matrice numérique du modèle dynamique du déplacement du module ANGELS

Rappelons que le modèle dynamique du module ANGELS s'écrit comme suit :

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu = \tau$$

La matrice d'inertie du module M_b est égale à :

$$M_b = \begin{bmatrix} 1.275 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0122 \\ 0 & 1.275 & 0 & 0 & 0 & -0.001963 \\ 0 & 0 & 1.275 & -0.0122 & 0.001963 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0122 & 0.156 & 0.00936 & 0.000269 \\ 0 & 0 & 0.001963 & 0.00936 & 0.61 & 0.0000633 \\ 0.0122 & -0.001963 & 0 & 0.000269 & 0.0000633 & 0.725 \end{bmatrix}$$

La matrice des masses ajoutés par le fluide est égale à :

$$M_{fluide} = \begin{bmatrix} -0.8888 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8699 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.8652 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0003212 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0023 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0013 \end{bmatrix}$$

La matrice d'inertie totale M est égale à la somme des deux matrices M_b et M_f . D'où :

$$M = \begin{bmatrix} 0.3862 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0122 \\ 0 & 0.4051 & 0 & 0 & 0 & -0.001963 \\ 0 & 0 & 0.4098 & -0.0122 & 0.01963 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0122 & 0.1556788 & 0.00936 & 0.000269 \\ 0 & 0 & 0.001963 & 0.00936 & 0.6077 & 0.0000633 \\ 0.0122 & -0.001963 & 0 & 0.000169 & 0.0000633 & 0.7237 \end{bmatrix}$$

La matrice des Coriolis finale, égale à la somme des coriolis du module et les masses ajoutées par le fluide, est :

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.012r & 0.002r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.165 \ u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2.165 \ u & 0.012r \\ -0.012r & 0 & 0 & 0 & -0.00006r & 0.61 \ r \\ 0.002r & 0 & 2.165 \ u & 0.00006r & 0 & -0.0094r \\ 0 & -2.165 \ u & -0.012r & -0.61 \ r & 0.0094r & 0 \end{bmatrix}$$

Enfin, le modèle dynamique du module ANGELS dans sa version numérique finale est comme suit :

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} 0.3862 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0122 \\ 0 & 0.4051 & 0 & 0 & 0 & -0.001963 \\ 0 & 0 & 0.4098 & -0.0122 & 0.01963 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0122 & 0.1556788 & 0.00936 & 0.000269 \\ 0 & 0 & 0.001963 & 0.00936 & 0.6077 & 0.0000633 \\ 0.0122 & -0.001963 & 0 & 0.000169 & 0.0000633 & 0.7237 \end{bmatrix} \dot{\nu} \\
& + \\
& \begin{bmatrix} 0.1408u + 2.903u|u| & 0 & 0 & 0.012r & 0.002r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.165u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2.165u & 0.012r \\ -0.012r & 0 & 0 & 0 & -0.00006r & 0.61r \\ 0.002r & 0 & 2.165u & 0.00006r & 0 & -0.0094r \\ 0 & -2.165u & -0.012r & -0.61r & 0.0094r & 0 \end{bmatrix} \nu \\
& = \\
& \begin{bmatrix} 2D_{helice}^4 K_n^2 U(0.00165U - 0.000095 \frac{u}{D_{helice}}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ l_{(3)x} \rho D_{helice}^4 K_n^2 U(0.00165U - 0.000095 \frac{u}{D_{helice}}) \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Table des figures

1	Le robot thon du M.I.T inspiré du thon naturel (www.sciencemuseum.org.uk/image , www.linternaute.com).	2
2	Le robot Japonais ACM6-R5 inspiré du serpent (info-japan.ru et www.linternaute.com).	3
3	Le robot Amphibot III de l'EPFL inspiré de la Lamproie (birg2.epfl.ch).	3
4	Le robot RAAMO inspiré de l'anguille (www.lejournalnature.com et www.irccyn.ec-nantes.fr).	3
5	Le robot Lampetra de l'SSSA inspiré de la Lamproie (www.lampetra.org).	4
6	Configurations du robot ANGELS : (a) neuf module reproduisant la nage d'une anguille et (b) un seul module se déplace à l'aide des propulseurs.	5
7	Les trois dynamiques associées à la nage.	5
1.1	Schéma représentatif du principe du banc d'essai.	7
1.2	Photographies des différents composants du banc d'essai hydrodynamique : aquarium (a), turbine installée au fond de l'aquarium (b), et (c) et (d) aquarium après l'installation de la géométrie interne.	8
1.3	Schéma représentatif de la mesure de vitesse par courantomètre à hélice.	9
1.4	Profil de vitesse finalement obtenu.	9
1.5	Vitesse de l'écoulement en fonction de la fréquence de rotation de la turbine axiale.	10
1.6	Photographie du banc d'essai final.	11
1.7	Illustration de la technique d'acquisition de vidéo et de traitement d'image	12
1.8	Photographie du banc d'essai instrumenté pour effectuer des mesures PIV.	13
1.9	Schéma explicatif du calcul du champs de vitesses par la méthode PIV. D'après " www.dantecdynamics.com ".	14
1.10	Exemple de couple d'images issu de la caméra CCD à partir duquel un champ de vitesse est calculé par la méthode de la PIV.	15
2.1	Les quatre catégories classiques du mode de propulsion ondulatoire illustrées par Lauder et Tytell (2005).	19
2.2	Schéma représentatif de l'ondulation axiale du corps de l'anguille et des différents paramètres cinématiques de l'équation 2.1.	21
2.3	Le banc d'essai et la zone d'étude.	22

2.4	Procédure expérimentale : la silhouette de l'anguille est filmée à l'aide d'une caméra à 24 images/seconde.	22
2.5	Photographie de la cage en dehors du banc d'essai (a) et photographies de l'anguille nageant dans le banc d'essai (b) et (c).	23
2.6	Photographie de la nage d'une anguille naturelle durant une période de nage complète.	24
2.7	Principe de squelettisation.	25
2.8	Schéma de l'algorithme de traitement d'image.	25
2.9	Schéma de l'algorithme d'optimisation des paramètres cinématiques.	27
2.10	Silhouettes médianes représentées sur une demie-période de nage à contre-courant.	28
2.11	Squelettes de l'anguille superposés pour une période de nage complète. (a) résultat expérimental et (b) résultat obtenu à partir du modèle cinématique décrit par Tytell (2004a) (équation 2.1).	29
2.12	Différence d'ondulation entre la nage à contre courant de face et nage en courant traversier.	29
2.13	Silhouettes médianes représentées sur une demin-période de nage dans un courant traversier.	30
2.14	Squelettes de l'anguille (vue de dessus) sur une période complète de nage en biais.	31
2.15	Approche géométrique de la différence entre l'oscillation axiale et non axiale.	32
2.16	Déplacement latéral du corps de l'anguille en fonction du temps. Résultats expérimentaux des squelettes de l'anguille superposés pour une période de nage complète.	34
2.17	Déplacement latéral du corps de l'anguille en fonction du temps. Résultats obtenus à partir du modèle cinématique décrit dans l'équation 2.4. Reproduction des squelettes présentés dans la figure 2.16.	36
2.18	Oscillation latérale de différentes positions du corps de l'anguille en fonction du temps, pour les nages par ondulation axiale (a) et ondulation non-axiale (b). (c) Schéma représentant les positions choisies sur le corps de l'anguille. Les contours en pointillés représentent les résultats expérimentaux et les contours solides représentent les résultats obtenus par le modèle.	37
3.1	Domaine considéré pour établir la théorie de Lighthill (1971)	40
3.2	Section elliptique du corps.	43
3.3	Schéma représentatif des deux mouvements de translation d'une section d'un corps lors de la nage.	45
3.4	Schéma des deux types de cylindres utilisés.	45
3.5	Photographies des modèles cylindriques à sections elliptiques.	47
3.6	Schéma du dispositif expérimental permettant de visualiser l'écoulement dans les sections transversales des modèles cylindriques.	48

3.7	Schéma représentatif du dispositif expérimental dans la première configuration. À droite, schéma en perspective. À gauche, deux photographies présentant le champ de mesure PIV dans la section transversale du cylindre elliptique à section variable.	49
3.8	Schéma représentatif du dispositif expérimental dans la seconde configuration. À droite, schéma en perspective. À gauche, deux photographies présentant le champ de mesures PIV dans la section transversale du cylindre elliptique à courbure non nulle.	49
3.9	Résultat PIV du champ de vecteurs vitesses dans la section latérale du cylindre elliptique à section variable C_1 : (a) photo instantanée et (b) champ de vitesses moyenné sur 1500 mesures instantanées.	50
3.10	Champs de vitesses dans la section latérale du cylindre à section variable : (a) résultat théorique et (b) résultat expérimental (figure 3.9 b).	51
3.11	Deux photos PIV capturées par la caméra CCD dans la section latérale d'un cylindre courbé (ici cylindre C_4) à deux instants différents.	52
3.12	Résultats PIV des champs de vitesses instantanés mesurés dans les sections latérale des cylindres $C_2 - C_5$: à gauche, les champs de vecteurs de vitesses et à droite, les lignes de courants correspondant.	54
3.13	Lignes de courants dans les sections latérale des cylindres $C_2 - C_5$: à gauche, les résultats théoriques et à droite, les résultats expérimentaux présentés dans la figure 3.12.	55
4.1	La nage dans une allée de vortex alternés : (a) une membrane piézoélectrique en synchronisation avec la fréquence des vortex (Allen et Smits 2001), (b) une truite vivante nageant dans une allée BvK (Liao <i>et al.</i> 2003a) (c) et une truite anesthésiée dans l'allée BvK (Beal <i>et al.</i> 2006).	58
4.2	Allée de vortex de Bénard–von Kàrmàn (BvK) dans le sillage d'un cylindre (a) et allée de vortex de Bénard–von Kàrmàn inversée (BvK inversée) dans le sillage d'un poisson (b). Cette illustration a été présentée par Eloy (2012).	58
4.3	Illustration de la nage en groupe comme décrite par Wheis (1973). Le losange pointillé montre la formation en losange et le rectangle en pointillé montre l'allée BvK obtenue entre deux allées de BvK inversées.	59
4.4	Schémas et photographies du système d'oscillation à double ailerons. Vue de face, schéma (a_1) et photo (a_2). Vue de dessus, schémas des systèmes d'oscillation en phase et antiphase (b_1) et photo (b_2). Aileron rigide, schéma (c_1) et photo (c_2).	61
4.5	Schéma du dispositif expérimental mis en place pour effectuer l'étude de l'interaction hydrodynamique.	62
4.6	Photographies de la section de travail équipée pour réaliser l'étude d'interaction hydrodynamique.	64

4.7	Représentation schématique du sillage tourbillonnaire obtenue dans le sillage du système à double aileron. Le rectangle bleu (pointillés) représente une allée BvK inversée (a) et le rectangle en rouge (pointillés) représente une allée BvK (b).	65
4.8	L'allée BvK générée dans le sillage des deux ailerons. À gauche, vecteurs vitesse (avec en arrière plan la norme des vitesses). À droite, le champs de vorticité correspondant. De haut vers le bas, les quatre clichés représentent le suivi temporel de l'allée pour une période d'oscillation.	67
4.9	L'allée BvK inversée générée dans le sillage d'un aileron. À gauche, vecteurs vitesse (avec en arrière plan la norme des vitesses). À droite, le champs de vorticité correspondant. De haut vers le bas, les quatre clichés représentent le suivi temporel de l'allée pour une période d'oscillations.	68
4.10	Photographies du robot Amphibot III. À gauche, une vue de dessus. À droite, la nage du robot dans l'allée tourbillonnaire des ailerons (photo sous marine).	69
4.11	Schémas de configurations entre le robot et l'allée BvK : la configuration de référence (a), déphasage impliqué par la loi de commande et (c) déphasage par le déplacement du robot dans le référentiel lié au laboratoire.	71
4.12	Exemple d'un signal de la force axiale de la nage du robot dans un écoulement uniforme (a) et l'analyse spectrale correspondante par FFT (b).	72
4.13	Forces de trainées axiales (F_x) exercées respectivement par un écoulement uniforme et un écoulement tourbillonnaire BvK sur le robot en mode passif (pas de nage du robot). (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.	75
4.14	Forces latérales (F_y) exercées respectivement par un écoulement uniforme et un écoulement tourbillonnaire BvK sur le robot en mode passif (pas de nage du robot). (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.	75
4.15	Forces de propulsions axiales (F_x) exercées par le robot respectivement dans un fluide au repos et dans un écoulement uniforme. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.	76
4.16	Forces latérales (F_y) exercées par le robot respectivement dans un fluide au repos et dans un écoulement uniforme. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.	76
4.17	Force axiale (F_x) exercées par le robot dans un écoulement tourbillonnaire de type BvK. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.	78
4.18	Force latérale (F_y) exercées par le robot dans un écoulement tourbillonnaire de type BvK. (a) Signal temporel et (b) analyse FFT.	78
4.19	Forces axiales moyennes en fonction de la position du robot par rapport au vortex de l'écoulement externe. Les deux courbes (a) et (b) représentent deux expériences réalisées dans les mêmes conditions, exception faite du temps initial t_0	79

4.20	Force axiale moyenne en fonction de la position du robot par rapport au vortex de l'écoulement externe. Les deux courbes (essais N °1 et 3) superposées sur le même graphe sont effectuées sous les mêmes conditions expérimentales, sauf que le temps de mesure (t_{mesure}) et le temps de initial (t_0) sont différents.	81
4.21	Photographies de l'anguille nageant dans l'allée BvK inversée. Photographies correspondants à deux instants différents.	83
4.22	Squelettes de l'anguille superposés pour une période complète d'ondulation dans une allée BvK inversée; résultat expérimental.	84
4.23	À gauche, image de l'anguille dans le sillage d'un aileron. À droite, le corps de l'anguille superposé au champs de vorticité de l'écoulement non-perturbé associé (allée BvK inversée). De haut vers le bas, cinq clichés représentant une période d'ondulation.	86
4.24	Comparaison entre les mécanismes de nages suivants : une anguille dans une allée BvK inversée (a) et une truite dans une allée BvK (b) (voir Liao (2007)).	87
4.25	S�ch�ma représentatif du modèle théorique simplifié, permettant d'estimer la force hydrodynamique exercée par un vortex sur le corps d'un poisson à corps allongé.	88
4.26	S�ch�ma représentatif d'une séquence de demi-période d'ondulation du corps d'un poisson à courbure constante (selon l'approche théorique) au voisinage d'un vortex en rotation positive (a) et négative (b).	89
5.1	Photographie du module ANGELS (gauche) et une vue CAO isométrique (droite).	91
5.2	Vues de dessus (a), de côté (b) et de face (c) du prototype Angels.	92
5.3	S�ch�ma représentatif des repères et références du module (AUV) du prototype ANGELS.	94
5.4	S�ch�ma représentatif du modèle elliptique choisi pour le calcul de la matrice des masses ajoutées par le fluide.	98
5.5	S�ch�ma représentant le dispositif expérimental	102
5.6	Forces de trainée en fonction de la vitesse de l'écoulement.	104
5.7	Coefficient adimensionnel de la trainée axiale appliquée sur le module.	105
5.8	Les composantes du système de propulsion.	106
5.9	S�ch�ma du système électromécanique du propulseur.	106
5.10	Forces de propulsion en régime statique des quatre hélices (photo à gauche).	108
5.11	Force de propulsion pour différentes vitesses d'écoulement (hélice numéro 3).	108
5.12	Force nette de propulsion en fonction de la tension de contrôle U (sans trainée système).	109
5.13	Coefficient adimensionnel de la force de propulsion axiale en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice.	110
5.14	S�ch�ma de l'algorithme de commande dont le modèle dynamique a été incorporé.	111
A.1	(a) stratégie de multibloc, (b) Vue isométrique du maillage de la géométrie	128

A.2	(a) Cas 2, (b) cas 4, contour de vitesse de l'écoulement et profil de vitesse dans le plan de symétrie à différentes abscisses de la zone de visualisation	130
-----	--	-----

Liste des tableaux

2.1	Paramètres cinématiques de la nage axiale : cas de référence (Tytell 2004a) et résultats obtenus.	28
2.2	Paramètres cinématiques obtenus à partir du modèle décrit dans l'équation 2.4. .	35
3.1	Caractéristiques géométriques des cylindres elliptiques	46
4.1	Protocole expérimental	74
4.2	Paramètres de la nage anguilliforme dans une allée BvK inversée (étude actuelle) et dans un écoulement uniforme (étude de référence Tytell 2004a).	84
5.1	Caractéristiques géométriques du module ANGELS par rapport à son centre de géométrie O_G	93
5.2	Caractéristiques électromécaniques du système de propulsion.	107
A.1	Paramètres de quatre configurations étudiées	129

Thèse de Doctorat

Younes MATAR

Etude expérimentale de la nage anguilliforme : application à un robot biomimétique Experimental study of anguilliform swimming: application to a biomimetic robot

Résumé

Pour améliorer les performances des robots sous-marins, l'une des approches poursuivie par les roboticiens, appelée biomimétisme, consiste à imiter ou à s'inspirer des systèmes vivants pour concevoir des robots de nouvelle génération.

C'est dans ce contexte que s'est récemment déroulé un projet européen nommé ANGELS, dont l'objectif est la réalisation d'un robot bio-inspiré de l'anguille. Ce travail expérimental s'inscrit dans ce projet et est consacré à l'étude de la nage du robot.

Les expériences ont été réalisées dans un canal hydraulique conçu pour cette étude. Dans un premier temps, nous avons caractérisé par traitement d'images les allures (i.e. les lois de déformation du corps) adoptées par une anguille nageant soit dans un écoulement uniforme frontal ou dans un courant traversier. Cette étude a donné lieu à l'établissement d'un modèle mathématique corrélatif de la déformation du corps de l'anguille dans ces conditions de nage.

Dans un second temps, afin d'étudier les effets de la déformation du corps sur l'écoulement latéral, produit lors de la nage, des expériences par PIV ont été réalisées sur différents modèles de cylindres elliptiques rigides. Ces résultats nous ont permis de mieux comprendre et de valider une approche théorique permettant de calculer la force de propulsion en réponse à la loi de déformation du corps.

Enfin, des expériences portant sur la nage anguilliforme dans un écoulement de type allée de von-Kármán ont été réalisées en vue d'étudier les interactions hydrodynamiques et en particulier les mécanismes d'extraction de l'énergie de l'écoulement incident. Ces expériences ont été réalisées avec une anguille et un robot anguilliforme. Les expériences menées sur le robot montrent que pour une même loi de déformation du corps, la force de propulsion générée, en comparaison avec le cas de l'écoulement uniforme, peut sous certaines conditions être augmentée de près de 30

ont, quant à elles, permis de mettre clairement en évidence une modification de l'allure de nage de l'anguille lorsqu'elle est placée dans une allée de von-Kármán. L'analyse qualitative de cette nouvelle allure nous a conduit à proposer un mode particulier d'extraction d'énergie de l'écoulement.

Mots clés

**Nage anguilliforme – Interactions hydrodynamiques
- Expérimentations PIV – Allée von-Kármán BvK –
Robot biomimétique**

Abstract

In order to improve the performance of the submarine robots, the robotics community has been considered a new approach known as the biomimetic. It consist on the study of a living systems such, fish, to design and construct a bio-inspired robot.

In this context, recently was took place an European project called ANGELS, in which the objective is to design and construct a fish-like robot inspired from the swimming of the eel. This thesis takes place in this project and is dedicate to the study of the swimming of the robot.

Experiments were carried out in a hydrodynamic test bed designed and entirely set up for this study. At first, the kinematic shapes (i.e. deformation of the body) adopted by living eel during its swimming against or slantwise a uniform flow, were characterized by mean of an image processing analysis technique. This study has allowed the establishing of a mathematical correlative model, describing the deformation of the eel's body in these swimming conditions.

Secondly, we studied the effects of the body's deformation on the lateral flow produced during swimming. PIV experiences were carried out on different elliptic cylinder shapes. These experiments have allowed the understanding and the validation of a theoretical approach, concerning the swimming dynamic of the fish, used to obtain the propulsion force produced in reply of the body deformation during swimming.

Finally, experiments were carried out during the anguilliform swimming in a non-uniform flow such as, a von-Kármán vortex street. The goal was to study the hydrodynamics interactions and in particular the mechanisms of the exploited vortices adopted by fish. These experiences were realized on the swimming of a living eel and an anguilliform robot. Experiments led on the robot show that under certain conditions, the propulsive force of the robot swimming in a von-Kármán vortex street can be increased of about 30 comparison to its swimming in a uniform flow. Experiments with eel have allowed the highlighting of a particular shape of its body deformation formed when it's swimming in a reverse von-Kármán vortex street. The qualitative analysis realized on this kinematic observation led us to propose a mechanism adopted by the eel to exploited energy from altered flow.

Key Words

**Anguilliform swimming – PIV experiments –
hydrodynamic interactions – von-Kármán street
BvK – biomimetic robot**